

WP3-A2. Estudio comparativo de tecnologías de la información aplicadas a la gestión de residuos a nivel internacional en el sector de la piedra.



Esta obra está licenciada bajo una [Licencia Internacional Creative Commons Atribución-CompartirIgual 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

"Financiado por la Unión Europea. Las opiniones y puntos de vista expresados solo comprometen a su(s) autor(es) y no reflejan necesariamente los de la Unión Europea o los de la Agencia Ejecutiva Europea de Educación y Cultura (EACEA). Ni la Unión Europea ni la EACEA pueden ser considerados responsables de ellos."



Transilvania
University
of Brasov



Índice

1. INTRODUCCIÓN	4
2. GESTIÓN DE RESIDUOS Y DIGITALIZACIÓN: UNA VISIÓN GENERAL.....	5
2.1. Gestión de residuos en la industria de la piedra	6
2.2. Transformación digital en la gestión de residuos.....	7
2.3. Tecnologías clave de la información aplicadas.....	9
2.3.1. Sistemas de seguimiento de residuos y trazabilidad	9
2.3.2. Contenedores inteligentes, monitorización remota y IoT	11
2.3.3. Inteligencia Artificial (IA) y clasificación automatizada.....	12
2.3.4. Análisis de datos y soporte a la toma de decisiones.....	12
2.3.5. Aplicaciones móviles y participación de los grupos de interés	13
2.3.6. Blockchain y arquitecturas integradas	13
2.4. Marco político de la UE	14
2.4.1. Pacto Verde Europeo.	15
2.4.2. Plan de Acción para la Economía Circular (CEAP, 2020).	15
2.4.3. Programa de Europa Digital (DIGITAL).	16
2.4.4. Implicaciones para RockChain.....	16
3. GESTIÓN DE RESIDUOS Y PLANES DE ESTUDIO PARA LA ADOPCIÓN DE TI	17
3.1. ALEMANIA.....	17
3.1.1. Adopción de TI e iniciativas de digitalización.....	18
3.1.2. Proyectos, programas y políticas relevantes	18
3.1.3. Implicaciones para RockChain.....	20
3.2. ESPAÑA	20
3.2.1. Adopción de TI e iniciativas de digitalización.....	21
3.2.2. Proyectos, programas y políticas relevantes	22
3.2.3. Implicaciones para RockChain.....	23
3.3. RUMANIA.....	23
3.3.1. Adopción de TI e iniciativas de digitalización.....	23
3.3.2. Proyectos, programas y políticas relevantes	24
Implicaciones para RockChain.....	25
3.4. CROACIA	26
3.4.1. Adopción de TI e iniciativas de digitalización.....	26
3.4.2. Proyectos, programas y políticas relevantes	26

Implicaciones para RockChain.....	28
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	29
4.1. ALEMANIA.....	30
Fortalezas en la adopción y oferta de formación en TI.....	30
Debilidades y lagunas.....	30
Potencial de integración con los principios de la economía circular	31
4.2. ESPAÑA	31
4.2.1. Fortalezas en la adopción y oferta de formación en TI.....	32
4.2.2. Debilidades y brechas	32
4.2.3. Potencial de integración con los principios de la economía circular	33
4.3. RUMANIA.....	33
4.3.1. Fortalezas en la adopción y oferta de formación en TI.....	33
4.3.2. Debilidades y brechas	34
4.3.3. Potencial de integración con los principios de la economía circular	34
4.4. CROACIA	35
4.4.1. Fortalezas en la adopción y oferta de formación en TI.....	35
4.4.2. Debilidades y lagunas.....	36
4.4.3. Potencial de integración con los principios de la economía circular	36
5. MEJORES PRÁCTICAS.....	38
5.1. SOLUCIONES DIGITALES PROBADAS.....	38
IoT y logística inteligente (Capa de Eficiencia)	38
Herramientas digitales para CDW (Capa de Valoración)	38
EdTech y Blockchain (Capa de Habilidades).....	39
5.2. LECCIONES PARA EL SECTOR DE PIEDRA	39
5.3. PAPEL ESTRATÉGICO DE ROCKCHAIN	39
Un campo de pruebas sin riesgos	39
Apontando la brecha IT–Stone.....	40
Preparación para la regulación	40
6. CONCLUSIONES	41
7. REFERENCIAS.....	42
Fuentes de las cifras	50

1. INTRODUCCIÓN

Este informe presenta los resultados del WP3-A2, Estudio comparativo de tecnologías de la información aplicadas a la gestión de residuos a nivel internacional en el sector de la piedra.

El objetivo principal es analizar cómo se están incorporando las herramientas digitales en los procesos de gestión de residuos y qué impacto tienen en la sostenibilidad y competitividad del sector. Este análisis es una parte esencial del proyecto RockChain, que pretende transformar la gestión de residuos de piedra mediante soluciones innovadoras como Blockchain, el Internet de las Cosas (IoT) y el análisis de Big Data.

Basándose en estudios de caso de España, Alemania, Croacia y Rumanía, el documento ofrece una visión clara de los enfoques nacionales actuales. También destaca oportunidades de colaboración que podrán sentar las bases de una estrategia europea común, superando así la fragmentación existente y avanzando hacia un marco digital unificado.

Los resultados obtenidos permiten definir las mejores prácticas y formular recomendaciones estratégicas dirigidas a actores del sector, responsables de políticas públicas y centros educativos, con el objetivo de promover la transición dual digital y ecológica promovida por la Unión Europea.

2. GESTIÓN DE RESIDUOS Y DIGITALIZACIÓN: UNA VISIÓN GENERAL

A lo largo de toda la cadena de valor de la piedra natural en Europa, desde la extracción y corte hasta el pulido y acabado, la generación de residuos es una constante en cada etapa. Tradicionalmente, la gestión de residuos se centraba en almacenar o eliminar los residuos de forma segura. Sin embargo, hoy en día el enfoque ha cambiado: el objetivo es medir, clasificar y rastrear estos materiales casi en tiempo real, con la intención de reutilizarlos como materias primas secundarias, por ejemplo, reemplazando áridos o aglutinantes en la construcción.

Este cambio está en línea con las prioridades europeas sobre economía circular y intercambio de datos. Cada vez hay más estudios técnicos que respaldan este nuevo enfoque: si la composición mineral y el tamaño de las partículas se controlan con precisión, los lodos y los escombros pueden sustituir eficazmente los materiales primarios en morteros, hormigones y otros productos (EEA, 2021; Parlamento Europeo, 2024).

La digitalización es la herramienta clave que hace posible esta transformación. Gracias a diversas tecnologías integradas, los residuos físicos se convierten en datos útiles y manejables:

- **IoT y sensores:** Estos permiten un registro continuo del nivel de llenado, el peso y la humedad en silos y contenedores.
- **Visión por ordenador e inteligencia artificial:** Estos utilizan cámaras para clasificar automáticamente los materiales.
- **Drones (UAV):** Estos realizan escaneos volumétricos de los almacenes mediante fotogrametría o LiDAR.
- **Trazabilidad:** Los lotes físicos se vinculan a registros digitales mediante códigos QR, etiquetas RFID o, pronto, el **Pasaporte Digital de Producto (DPP)**.



Figura 1: Pasaporte de Producto Digital

La adopción de indicadores clave de rendimiento (KPI) comunes, como la relación residuos-producto, la intensidad energética (kWh/t), la huella de carbono (CO₂e/t) y el coste del tratamiento (€/t), permite a las empresas medir su progreso y apoyar sus esfuerzos de sostenibilidad con datos (EEA, 2021; Voukkali et al., 2023).

2.1. Gestión de residuos en la industria de la piedra

A lo largo de la cadena de valor de la piedra natural, se generan tres tipos principales de residuos: lodos de corte y pulido (una mezcla de agua y partículas finas de piedra), fragmentos sólidos y polvo mineral. Estos residuos representan un volumen considerable a nivel europeo. En 2022, por ejemplo, las actividades de construcción generaron alrededor del 38,4% del total de residuos en la UE-27, mientras que la minería y la extracción contribuyeron con otro 22,7% (Eurostat, 2024). Por esta razón, los sectores vinculados al manejo de minerales y áridos son clave para las actuales estrategias de economía circular y trazabilidad.

Más allá de la eliminación segura, numerosos estudios han demostrado que tanto el lodo como los residuos sólidos pueden utilizarse como sustitutos parciales en materiales de construcción, como morteros, capas base o aglutinantes innovadores. Sin embargo, para que estas soluciones se implementen a escala industrial, es esencial que ciertas propiedades (como la composición mineral, la distribución del tamaño de las partículas y las condiciones de procesamiento) permanezcan dentro de rangos específicos. En este

sentido, la estandarización de los métodos de caracterización es un paso clave para pasar de pruebas de laboratorio exitosas a la adopción real en el mercado (Afonso et al., 2023; Gehlot & Shrivastava, 2023).

Waste generation by economic activities and households, EU, 2022

(% share of total waste)

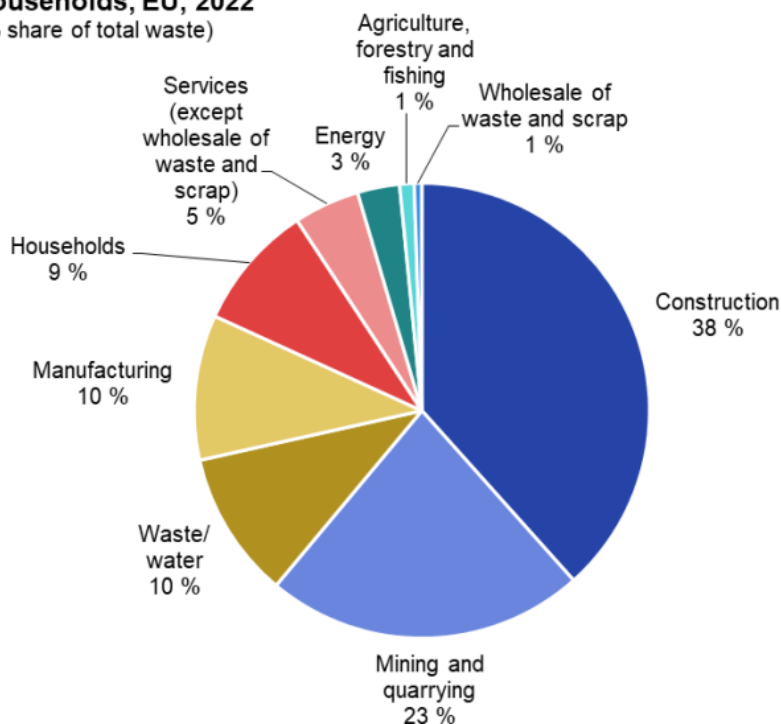


Figura 2: Generación de residuos por parte de actividades económicas y hogares, 2022

En este contexto, la gestión moderna de residuos requiere indicadores claros y datos actualizados sobre volúmenes y flujos disponibles. Entre los indicadores más relevantes para evaluar el rendimiento se encuentran:

- **Eficiencia** en el uso de materiales: toneladas de residuos por tonelada de producto terminado.
- **Intensidad energética**: consumo de energía por tonelada producida (kWh/t).
- **Huella** medioambiental: emisiones de gases de efecto invernadero por tonelada (CO₂e/t).
- **Eficiencia de costes**: coste por tonelada tratada (€/t).

El seguimiento constante de estos indicadores permite a las empresas detectar ineficiencias y planificar la logística y las estrategias de recuperación con mayor precisión, basándose en datos concretos en lugar de estimaciones (EEA, 2021).

2.2. Transformación digital en la gestión de residuos

La digitalización está transformando radicalmente la forma en que se gestionan los residuos en plantas de procesamiento y canteras. El modelo tradicional, basado en intervenciones reactivas—por ejemplo, actuar solo cuando los contenedores están llenos o surgen problemas—está dando paso a una gestión proactiva, guiada por datos en tiempo real. Esto proporciona inventarios actualizados y datos auditables sobre la calidad de los materiales.

Este cambio de enfoque implica tratar lodos y residuos no como residuos indiferenciados, sino como materiales gestionados con características definidas: origen, contenido de humedad, tamaño de partícula y volumen. La medición continua y la trazabilidad facilitan una planificación más precisa, reducen el consumo de energía por tonelada y optimizan la logística. Además, los paneles de datos compartidos ofrecen a clientes y autoridades una visión transparente y verificable del rendimiento (Berg et al., 2020; EEE, 2021).

En el sector de la piedra natural, esta transformación digital se basa en cuatro pilares estratégicos:

- Monitorización volumétrica de los almacenes: Los drones equipados con cámaras o escáneres láser realizan vuelos automáticos sobre los almacenes. Utilizando técnicas como la fotogrametría o el escaneo LiDAR, las imágenes se convierten en nubes de puntos 3D. Si se utilizan puntos de control en tierra (GCP) o GPS RTK, es posible calcular volúmenes con alta precisión. Según varios estudios, estas estimaciones tienen márgenes de error similares a los de los escáneres terrestres, típicamente entre el 1% y el 6%, lo cual es suficiente para la gestión diaria de inventarios y márgenes de seguridad (Alsayed et al., 2023; Kokamägi et al., 2020; Kovanič et al., 2023).
- Rutas dinámicas y recogida inteligente: Los sensores IoT instalados en contenedores y vehículos miden variables clave como el nivel de llenado, el peso o las vibraciones y envían los datos a una plataforma central. En lugar de seguir rutas fijas, los algoritmos priorizan la recogida basándose en la capacidad alcanzada o la utilización de la carga por viaje. Este modelo, ya probado en ciudades inteligentes, reduce significativamente las rutas y tiempos de recogida y puede aplicarse directamente en contextos de cantera (Khan et al., 2024).
- Etiquetado digital de fracciones: Cada lote de lodo o escombros se registra como un "objeto de datos". Identificadores físicos, como los códigos QR en bolsas o etiquetas RFID en palés, vinculan el material con su gemelo digital, que incluye información sobre su origen (línea, desplazamiento), propiedades físicas (contenido de humedad, distribución del tamaño de las partículas) y tratamiento previo. Al integrarse con sistemas ERP o MES, se pueden activar controles automáticos de calidad, como bloquear lotes que superan ciertos niveles de humedad hasta que se reacondicionan, lo que también facilita auditorías externas (Berg et al., 2020; EEE, 2021).

- Interoperabilidad de datos (Pasaporte Digital de Producto): A medida que los subproductos de la roca entran en el mercado de materiales de construcción, los compradores exigen información verificable y fácilmente compartible. La iniciativa del Pasaporte Digital Europeo de Producto (DPP) proporciona un marco estandarizado para el intercambio de datos sobre composición, ensayos y huella ambiental. La adopción de estos modelos de datos prepara al sector para futuros requisitos regulatorios y de contratación pública verde (EPRS, 2024; Wan et al., 2025).

El sector está evolucionando desde un enfoque de gestión de residuos hacia una verdadera gestión de materiales. Incluso con una infraestructura digital mínima (como el uso de drones para inventario, sensores para la logística y datos por lotes interoperables), ya se están observando beneficios concretos en costes, consumo energético y emisiones por tonelada, además de generar mayor confianza en materiales secundarios de origen en piedra (Alsayed et al., 2023; EEE, 2024; Khan et al., 2024).

2.3. Tecnologías clave de la información aplicadas

En el sector de la piedra natural, las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) no son un complemento, sino la base operativa que permite transformar los residuos en flujos medibles, rastreables y en constante mejora.

Estas herramientas digitales trabajan juntas para alcanzar tres objetivos clave:

- Visibilidad: Saber exactamente cómo, dónde y cuándo se generan lodos y escombros.
- Optimización: Mejorar la logística y los procesos de tratamiento, desde la recogida y acondicionamiento hasta la reutilización o venta.
- Cumplimiento normativo: Documentar el cumplimiento de las normativas medioambientales y los requisitos de calidad para materiales secundarios.

En el día a día, la gestión digital de residuos de roca combina varias tecnologías: sistemas de seguimiento de residuos, contenedores inteligentes con monitorización remota, clasificación asistida por inteligencia artificial, aplicaciones móviles para la elaboración de informes de campo y soluciones de trazabilidad como etiquetas RFID, códigos QR o registros basados en blockchain (Berg et al., 2020; EEE, 2021).

2.3.1. Sistemas de seguimiento de residuos y trazabilidad

Los sistemas de seguimiento de residuos aprovechan las TIC para monitorizar todo el ciclo de vida de los residuos de piedra: desde su generación en líneas de corte o pulido, pasando por el almacenamiento y transporte intermedios, hasta su recuperación o eliminación final.

- Monitorización de procesos: En canteras o plantas de procesamiento, el seguimiento comienza con sensores e instrumentos instalados en equipos clave (como sierras, líneas de pulido, prensas de filtración o silos) que registran los volúmenes generados y parámetros relevantes como el contenido de humedad o la composición del material. Esta información se centraliza en plataformas digitales que permiten el análisis de patrones en cantidad y calidad, facilitando la planificación basada en datos reales.
- Identificación digital y transporte: Para vincular cada lote físico a su registro digital, se colocan identificadores como códigos de barras, códigos QR o etiquetas RFID en contenedores, bolsas o palés. Estos códigos se escanean en cada etapa del proceso (secado, mezcla, carga), reduciendo errores manuales y creando un historial verificable. Si también está integrado con sistemas de geolocalización (SIG y GPS en camiones), la ruta logística puede monitorizarse para asegurar que los materiales lleguen a su destino autorizado.
- Integración con sistemas de gestión: En configuraciones más avanzadas, los módulos de seguimiento se conectan directamente a sistemas de planificación de recursos empresariales (ERP) o de gestión de producción. Esto permite alinear órdenes de producción con los flujos de residuos, generar indicadores de rendimiento precisos, automatizar informes regulatorios y verificar que los subproductos enviados a terceros cumplen con las especificaciones acordadas.



Figura 3: Seguimiento de residuos

2.3.2. Contenedores inteligentes, monitorización remota y IoT

Contenedores inteligentes y silos: Estos contenedores, aunque de aspecto convencional, están equipados con sensores industriales (como detectores ultrasónicos de nivel, células de carga o sensores de gas) así como módulos de comunicación. En la industria de la piedra, esta tecnología es clave para gestionar tanques de lodo, silos finos y contenedores de residuos. Los dispositivos envían datos en tiempo real sobre el nivel de relleno, peso u otras anomalías (como fugas o sobrecalentamiento) a una plataforma central. Esta visibilidad permite programar las recogidas según la capacidad real de los tanques, evitando viajes innecesarios con camiones medio vacíos y reduciendo significativamente el riesgo de vertidos peligrosos (Berg et al., 2020; Khan et al., 2024).



Figura 4: Contenedores inteligentes

Monitorización remota industrial: El Internet de las Cosas (IoT) no se limita al almacenamiento. También puede aplicarse para monitorizar maquinaria activa en la gestión de residuos. Equipos clave como bombas de lodo, prensas de filtración o cintas transportadoras pueden incorporar sensores para medir vibraciones, temperatura, presión o consumo energético. El sistema emite alertas si algún parámetro operativo se desvía de lo normal o si, por ejemplo, un contenedor permanece lleno durante demasiado tiempo. Esto permite el mantenimiento predictivo y previene fallos antes de que ocurran. En implementaciones más avanzadas, el personal de campo utiliza aplicaciones móviles que sugieren rutas optimizadas y permiten confirmar tareas en tiempo real, cerrando así el ciclo entre la planificación digital y la operación física (Kabugo et al., 2020; Khan et al., 2024).

2.3.3. Inteligencia Artificial (IA) y clasificación automatizada

La inteligencia artificial (IA) está revolucionando la gestión de residuos de roca a través de dos aplicaciones principales: la clasificación automática de materiales y la optimización de procesos basada en el análisis de datos.

Visión por ordenador y clasificación automática: Los sistemas de visión, que normalmente utilizan cámaras RGB o hiperespectrales instaladas en cintas transportadoras, pueden identificar materiales no deseados en tiempo real y analizar la distribución del tamaño de las partículas. Cuando el sistema detecta una fracción o contaminante fuera de especificación, activa una compuerta mecánica o un sistema de eyección de aire para separarlo. Esta tecnología, ya bien establecida en plantas de residuos de construcción y demolición (CDW), mejora significativamente la pureza de las fracciones recuperadas y reduce la necesidad de la clasificación manual, que a menudo es arriesgada e ineficiente.

Análisis y optimización de procesos: Más allá de la clasificación, los algoritmos de IA pueden procesar datos históricos del sistema para detectar patrones o ineficiencias que pasarían desapercibidos para el ojo humano. Esta capacidad analítica permite ajustar los procesos en tiempo real, reduciendo la intensidad energética (kWh/t) y manteniendo una calidad de subproducto más estable. Para empezar a aplicar estos modelos, suelen ser suficientes unas semanas de registros y un conjunto básico de imágenes etiquetadas, siempre que las condiciones de funcionamiento sean constantes.

2.3.4. Análisis de datos y soporte a la toma de decisiones

Más allá de la inteligencia artificial y la automatización, el análisis de datos, desde estadísticas descriptivas hasta paneles interactivos, es esencial para convertir la telemetría en decisiones concretas y útiles.

Apoyo para la toma de decisiones operativas: Analizar datos históricos y en tiempo real sobre la generación de residuos permite a los gestores de planta pasar de una gestión reactiva a una predictiva. Las aplicaciones prácticas incluyen optimizar los turnos de trabajo, dimensionar correctamente las áreas intermedias de almacenamiento e identificar el punto exacto de equilibrio económico para enviar un lote a reciclaje, basándose en el volumen acumulado y sus características de calidad.

Monitorización estratégica del rendimiento: A nivel estratégico, las herramientas analíticas permiten calcular los Indicadores Clave de Rendimiento (KPI) por línea de producción, turno o familia de productos. Algunos de los más relevantes incluyen:

- Eficiencia de materiales: toneladas de residuos por tonelada de producto.
- Intensidad energética: consumo energético por unidad producida (kWh/t).
- Circularidad: porcentaje de residuos desviados del vertedero.

Estos indicadores proporcionan una base objetiva para impulsar la mejora continua y cumplir con los marcos de reporte establecidos por la economía circular europea (Voukkali et al., 2023; EEE, 2024).

Participación de los grupos de interés: El análisis de datos también es una herramienta poderosa para impulsar el cambio de comportamiento. Mostrar a los operadores —o incluso a las comunidades locales— datos visuales sobre la reducción de residuos fomenta una gestión más responsable de los materiales. Además, estos datos sirven como base concreta para actividades formativas asociadas a iniciativas como RockChain.

2.3.5. Aplicaciones móviles y participación de los grupos de interés

Las aplicaciones móviles se han convertido en una herramienta clave para poner las TIC directamente en manos del personal operativo y de actores externos implicados en la cadena de valor.

Operaciones de campo: En canteras y plantas de procesamiento, estas aplicaciones permiten a los trabajadores realizar tareas directamente desde el terreno, sin tener que volver a una estación de trabajo fija:

- Notificación de incidentes: Permiten el registro inmediato de vertidos, bloqueos o eventos de contaminación, incluyendo fotos y datos de geolocalización.
- Verificación de tareas: Facilitan la confirmación en tiempo real de acciones como limpiar, mover o inspeccionar contenedores.
- Guías digitales: Integran listas de verificación para el cumplimiento normativo y módulos de microaprendizaje sobre el manejo adecuado de subproductos de la roca.

Vinculación con la cadena extendida: Más allá de las instalaciones, las aplicaciones móviles mejoran la coordinación con talleres, transportistas y otros socios, replicando modelos ya establecidos en la gestión de residuos urbanos:

- Coordinación logística: Permiten compartir en tiempo real los calendarios de recogida y los criterios de aceptación con pequeños talleres o contratistas de transporte.
- Monitorización ambiental: Ofrecen la posibilidad de denunciar vertederos ilegales, creando así un canal de comunicación bidireccional que ayuda a sincronizar las acciones entre productores, transportistas y recicladores.

2.3.6. Blockchain y arquitecturas integradas

La tecnología blockchain, como forma de Tecnología de Libro Mayor Distribuido (DLT), responde a una necesidad clave en la gestión de residuos: contar con una historia transparente e inviolable a lo largo de toda la cadena de valor.

Registro digital inmutable: Cada lote de lodo o escombros se representa digitalmente como un activo secuencial. En cada etapa (generación, condicionamiento, carga o

recepción) se registra un evento con una marca de tiempo y una firma criptográfica del actor responsable. Una vez validados e incorporados al registro, esos datos no pueden ser modificados. Esta historia inalterable refuerza la confianza entre socios comerciales y autoridades, especialmente en envíos transfronterizos donde la trazabilidad y la responsabilidad legal son fundamentales (Lim et al., 2021; Bułkowska et al., 2024).

IoT y contratos inteligentes: Estudios piloto han demostrado el potencial de combinar blockchain con sensores IoT a través de los llamados 'contratos inteligentes de residuos'. En estos casos, el propio código de la blockchain ejecuta acciones automáticas basadas en los datos capturados por los sensores. Por ejemplo, si un lote llega al destino correcto y los sensores confirman que el contenido de humedad está por debajo del límite acordado, el sistema puede liberar automáticamente un pago o emitir un certificado de aceptación. Esto reduce la carga administrativa y evita retrasos en los pagos (Lamichhane, 2017).

Arquitectura híbrida (on-chain y off-chain): Es importante señalar que blockchain no opera de forma aislada, sino como parte de una arquitectura más amplia. Para que sea viable, se requiere un enfoque híbrido:

- On-chain: Solo se almacenan metadatos esenciales (como hashes, marcas de tiempo o resúmenes de transacciones) para garantizar la integridad del sistema.
- Fuera de la cadena: Los archivos más pesados (como informes completos, certificados detallados o imágenes) se almacenan en bases de datos tradicionales o soluciones de almacenamiento descentralizadas como IPFS.

Ambos niveles deben estar conectados a sistemas existentes de planificación de recursos empresariales (ERP) o sistemas de ejecución de fabricación (MES), evitando la duplicación de datos. Este diseño pragmático combina la seguridad de la blockchain con la eficiencia de las herramientas tradicionales de TIC (Berg et al., 2020; Lim et al., 2021).

2.4. Marco político de la UE

La política europea sobre eficiencia de residuos y recursos se está estructurando en torno a un principio clave: en sectores con alto uso de materiales, la circularidad no es posible sin datos. Comprender qué ocurre con los materiales en cada etapa del proceso requiere cada vez más el uso de herramientas digitales.

Este marco se basa en tres pilares que definen tanto la normativa como las oportunidades de financiación para el sector de la piedra natural.

2.4.1. Pacto Verde Europeo.

Esta es la hoja de ruta de la UE para lograr la neutralidad climática para 2050. Más allá de la descarbonización, propone una 'transición justa' para sectores intensivos en recursos como la construcción y la extracción.

Implicaciones para el sector de la piedra: La industria debe alejarse del modelo lineal de 'extraer-usar-eliminar' y avanzar hacia ciclos cerrados donde lodos y residuos se reincorporan al proceso productivo o a mercados relacionados.



Figura 5: Pacto Verde Europeo

Requisito de datos: No basta con declarar progreso; debe demostrarse. Las empresas deben cuantificar la generación de residuos, las tasas de recuperación y los beneficios medioambientales con pruebas verificables (Comisión Europea, 2019).

2.4.2. Plan de Acción para la Economía Circular (CEAP, 2020).

Este plan implementa los objetivos del Pacto Verde mediante regulaciones específicas sobre productos. Promueve la prevención de residuos, el reciclaje de alta calidad y la eliminación de sustancias peligrosas para facilitar la reutilización segura.

Instrumento clave: Introduce la regulación de ecodiseño para productos sostenibles (ESPR) y el Pasaporte Digital de Producto (DPP).

Relevancia para el sector: Para que los subproductos de piedra sean aceptados en las cadenas de suministro de la construcción, deben contar con una 'identidad digital' que certifique su origen, composición y seguridad, generando así confianza entre los compradores (Comisión Europea, 2020)..

2.4.3. Programa de Europa Digital (DIGITAL).

Mientras que el Pacto Verde establece los objetivos, el programa DIGITAL proporciona los medios. Entre 2021 y 2027, financia las capacidades tecnológicas necesarias para poner en práctica la política.

Áreas prioritarias: inteligencia artificial, computación en la nube/edge y espacios de datos.

Aplicación: Reduce las barreras para implementar redes IoT y plataformas de trazabilidad al financiar la infraestructura necesaria para alcanzar los objetivos de circularidad (Comisión Europea, 2023).

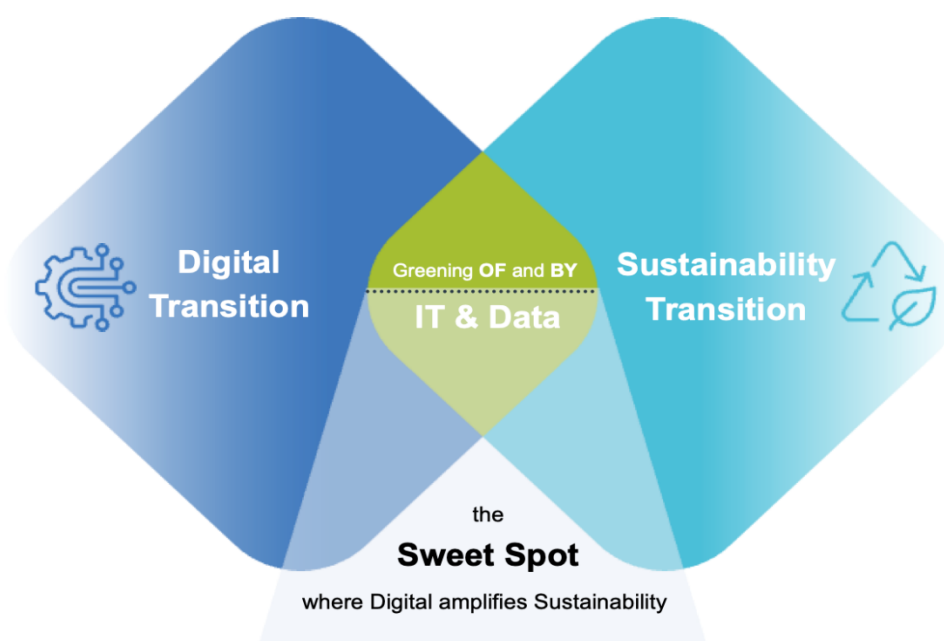


Figura 6: Transición de gemelos

2.4.4. Implicaciones para RockChain

La combinación de estas políticas crea un entorno favorable para RockChain. La alineación entre el Pacto Verde (objetivos de circularidad) y el programa DIGITAL (financiación tecnológica) refuerza la validez del enfoque del proyecto. Al integrar IoT, IA y blockchain para gestionar el desperdicio de piedra, RockChain no solo desarrolla soluciones técnicamente sólidas, sino que también responde directamente a la prioridad de la UE para una transición verde basada en datos.

3. GESTIÓN DE RESIDUOS Y PLANES DE ESTUDIO PARA LA ADOPCIÓN DE TI

Para evaluar el nivel de preparación del sector para la circularidad digital, este capítulo presenta un análisis comparativo de cuatro países clave dentro del proyecto: España, Alemania, Croacia y Rumanía.

El estudio está estructurado en torno a tres preguntas fundamentales que ofrecen una imagen clara de la situación actual:

- Realidad operativa: ¿Cómo se gestiona actualmente los residuos en el sector de la piedra natural?
- Madurez digital: ¿Qué grado de integración están las tecnologías digitales en las operaciones diarias?
- Impulsores del cambio: ¿Qué proyectos, programas y políticas están acelerando esta transformación?

El objetivo va más allá de un simple diagnóstico. El objetivo es identificar puntos de entrada viables para implementar sistemas de trazabilidad a lo largo de toda la cadena de valor, desde la extracción hasta la recuperación de residuos.

Este enfoque es especialmente relevante a nivel europeo. La construcción y la minería/extracción de canteras juntas representan el mayor volumen de generación de residuos en la UE. Por lo tanto, los lodos y los restos de la piedra constituyen un flujo estratégico de materiales que debe ser monitorizado, recuperado y transformado en materias primas secundarias para cumplir los objetivos de la economía circular (Eurostat, 2024).

Esta sección detallará cómo estas tendencias técnicas y marcos regulatorios se traducen en oportunidades concretas y necesidades específicas de formación para cada país analizado.

3.1. ALEMANIA

Alemania representa una paradoja en el panorama europeo: gestiona enormes volúmenes de residuos minerales (más de 200 millones de toneladas al año) con tasas de recuperación superiores al 90%, pero aún depende en gran medida de procesos de reciclaje de baja tecnología (como el vertedero). El reto ya no es la recogida de residuos, sino el uso de herramientas digitales para transformarlos en materiales secundarios de alta calidad.

El sector está empezando a alejarse de soluciones logísticas simples hacia soluciones tecnológicas avanzadas, con el objetivo de transformar los 'escombros' en activos ricos

en datos compatibles con estándares avanzados de fabricación y construcción (BMUV, 2023; Kreislaufwirtschaft Bau, 2024).

3.1.1. Adopción de TI e iniciativas de digitalización

A diferencia de otros mercados donde la digitalización comienza con tareas administrativas, la gestión de residuos en Alemania avanza rápidamente hacia la automatización operativa y la clasificación basada en IA.

- Desde la logística hasta el control de procesos: Aunque el uso de GPS y telemetría es común en la logística C&D, el siguiente paso es en las plantas de clasificación automatizadas. Las instalaciones más avanzadas están integrando sensores de infrarrojo cercano (NIR) y espectroscopía hiperespectral con brazos robóticos para separar fracciones minerales no solo por tamaño, sino también por composición química.
- La brecha de datos: A pesar de la madurez de este hardware, existe una gran brecha en la interoperabilidad de los datos. La información a menudo permanece 'bloqueada' dentro de software propietario. El esfuerzo actual es dismantelar estos silos utilizando plataformas en la nube que puedan agregar datos de plantas de trituración, excavadoras y camiones, calculando indicadores en tiempo real como las emisiones de CO₂ por tonelada o la pureza del material (Borchard et al., 2022; Onur, 2024).

3.1.2. Proyectos, programas y políticas relevantes

Alemania alberga varios proyectos de investigación e innovación de alto nivel que abordan específicamente la intersección entre tecnología, industria pesada y circularidad. Estas iniciativas van mucho más allá de simplemente apoyar a las pymes, centrándose en su lugar en definir los estándares técnicos del futuro para el sector.

- BLOCKWASTE (Blockchain para la gestión de residuos): Este proyecto aborda directamente la 'brecha de confianza' en los datos de residuos. Con la participación de la Fachhochschule Bielefeld (Universidad de Ciencias Aplicadas de Bielefeld), BLOCKWASTE explora cómo la tecnología blockchain puede generar registros inviolables para los flujos de residuos. Va más allá de la teoría, desarrollando herramientas educativas y estudios de caso sobre cómo utilizar libros mayores distribuidos para certificar que un lote específico de residuos ha sido tratado conforme a la normativa, una capacidad crucial para subproductos de piedra de alto valor (BlockWASTE Consortium, 2023).



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

Figura 7: Proyecto de residuos de bloque

- SmartRecycling-Up (IA y robótica): Liderado por DFKI (Centro Alemán de Investigación en Inteligencia Artificial), este proyecto es un ejemplo destacado de cómo transferir tecnología avanzada al sector de residuos. Desarrolla sistemas de control basados en IA para maquinaria pesada (grúas y excavadoras) para clasificar automáticamente residuos voluminosos y de construcción. El sistema utiliza visión por ordenador avanzada para "ver" y separar fracciones valiosas de montones mixtos, demostrando cómo la IA puede intervenir físicamente en el ciclo de materiales, reduciendo la dependencia de la clasificación manual peligrosa (DFKI, 2025).
- DigiEcoQuarry (piloto alemán - Mammendorf): La cantera de Mammendorf, operada por CSI cerca de Magdeburgo, es un sitio piloto clave para este proyecto Horizon 2020. Valida el 'Sistema Innovador de Canteras' (IQS) en un entorno de roca dura real. El piloto integra sensores, drones y plataformas de datos para optimizar la cadena de extracción y procesamiento. Para el sector de la piedra, esto demuestra en directo cómo los 'residuos' (finos y relaves) pueden reducirse en la fuente mediante decisiones de voladura y procesamiento basadas en datos (DigiEcoQuarry Consortium, 2024).

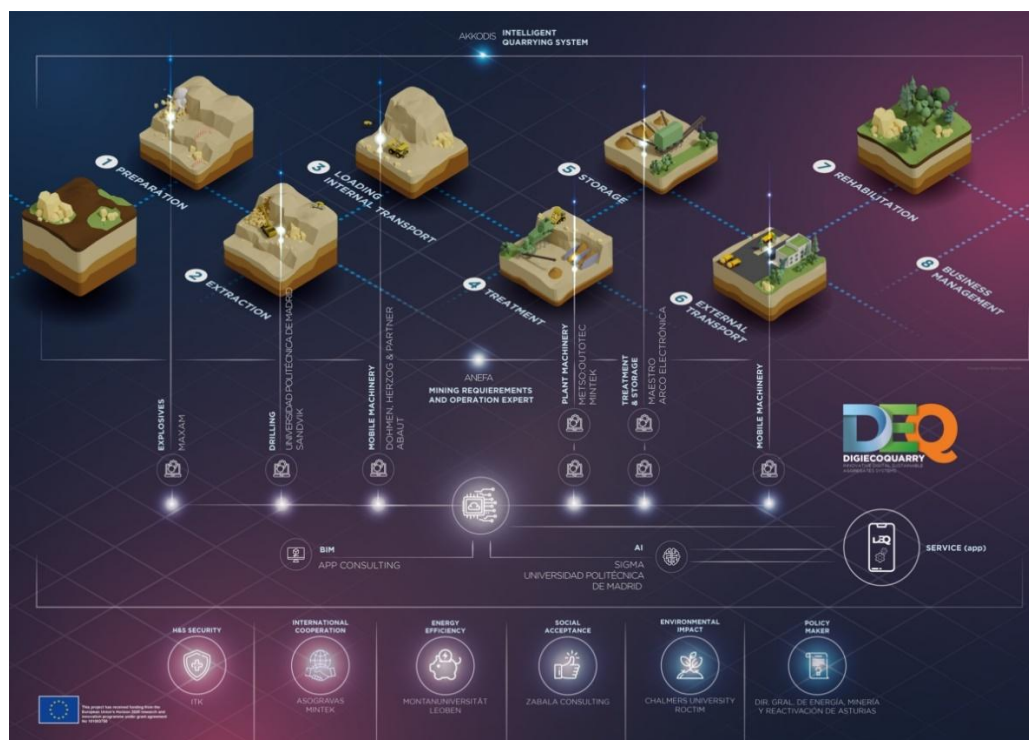


Figura 8: Proyecto DigiEcoQuarry

- KaSyTwin (Gemelos Digitales para Infraestructuras): Financiado por el Ministerio Alemán de Digitalización y Transporte (BMDV), este proyecto construye gemelos digitales de sistemas de alcantarillado utilizando IA y robótica. Aunque se centra en la infraestructura hídrica, ilustra una tendencia crucial para los materiales de piedra: la tendencia hacia el 'mantenimiento predictivo' y la gestión del ciclo de vida de los activos minerales. Muestra cómo la infraestructura basada en piedra puede gestionarse como una entidad digital, proporcionando datos que extienden la vida útil del activo y optimizan su recuperación al final de su ciclo de vida (BMDV, 2024).

3.1.3. Implicaciones para RockChain

Alemania representa un entorno sofisticado pero exigente para la implementación de pilotos RockChain. Aunque el país tiene altos estándares operativos, también impone estrictas barreras para la incorporación de nuevos materiales reciclados.

- Un campo de pruebas para la recuperación de alta calidad: A diferencia de otros mercados centrados en la reutilización básica, Alemania ofrece la posibilidad de desarrollar programas de formación centrados en el reciclaje orientado a la calidad. Las actividades formativas de RockChain pueden centrarse en cómo utilizar herramientas digitales, como IoT y blockchain, para demostrar que los subproductos de la piedra cumplen con los exigentes requisitos químicos y físicos establecidos por la Ordenanza de Sustitutos de Construcción (EBV).
- Interoperabilidad de datos como competencia clave: Con iniciativas como DigiEcoQuarry y SmartRecycling-Up activas en el país, existe una clara necesidad de profesionales capaces de conectar el mundo de la industria pesada con el análisis de datos. Por ello, el plan de formación debería enfatizar el uso de gemelos digitales y la integración de datos de sensores en los sistemas ERP existentes, superando así el enfoque tradicional de la presentación manual de informes.
- Alianzas estratégicas: La fuerte presencia de centros de investigación líderes, como DFKI, y las iniciativas de digitalización para pymes, como Mittelstand-Digital, proporcionan una red natural para difundir los resultados de RockChain. En este contexto, los futuros técnicos no solo recibirán formación en gestión de residuos, sino también en una visión más amplia de 'gestión de recursos industriales', en línea con la estrategia nacional que busca posicionar los residuos como productos estandarizados para el mercado.

3.2. ESPAÑA

En muchos sentidos, España se ha convertido en un 'laboratorio viviente' para aplicar principios de circularidad en el sector mineral. Impulsada por la estrategia 'Circular España 2030' y los estrictos requisitos de la Ley 7/2022 sobre residuos y suelos contaminados, la industria se está alejando de la simple eliminación de residuos para orientarse hacia la recuperación mediante tecnologías avanzadas.

El enfoque ya no está solo en reducir los residuos, sino en construir un ecosistema digital donde canteras, plantas de procesamiento y centros de reciclaje estén interconectados. Este cambio cuenta con el apoyo de una red activa de centros tecnológicos (como Tecnalia, IETcc-CSIC, CTM) y asociaciones industriales como ANEFA.

3.2.1. Adopción de TI e iniciativas de digitalización

España lidera algunos de los proyectos más avanzados de Europa basados en el concepto de 'Cantera Digital'. La digitalización ya no es solo una aspiración: se está probando y aplicando en entornos operativos reales.

- Producción sensorializada: A través de proyectos como DigiEcoQuarry, se están implementando sistemas mineros innovadores (IQS) en canteras españolas. Estos sistemas utilizan redes de sensores IoT para capturar datos en tiempo real sobre la extracción y el procesamiento, permitiendo optimizar la proporción producto-desperdicio en la fuente.

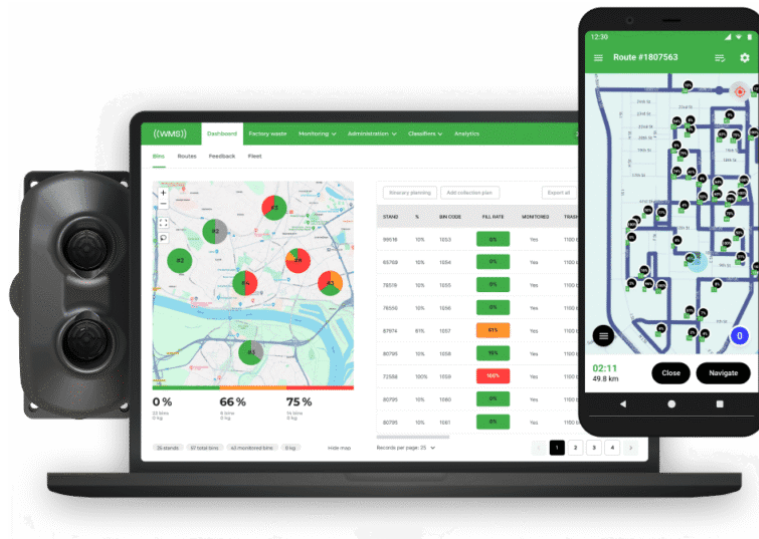


Figura 9: Sensoneo

- Despliegue masivo de IoT: Más allá de las canteras, España destaca por su madurez digital en logística de residuos. Madrid, por ejemplo, está desplegando el mayor proyecto de residuos inteligentes de Europa, con más de 11.000 sensores (Sensoneo) instalados para optimizar las rutas de recogida en tiempo real. Esta escala demuestra que la infraestructura IoT necesaria para rastrear los residuos industriales de piedra ya es viable y operativa en el país.

- Control volumétrico con drones: El uso de UAVs para gestionar reservas se está convirtiendo en una práctica común en grandes canteras de granito y mármol. Más allá de la fotografía aérea, la fotogrametría se utiliza para calcular volúmenes exactos de residuos y subproductos, integrando estos datos en sistemas ERP para una valoración precisa de inventarios (Himmy et al., 2025).

3.2.2. Proyectos, programas y políticas relevantes

España tiene un ecosistema muy activo que conecta las tecnologías digitales con la gestión de residuos minerales. Las entidades españolas también desempeñan un papel destacado en iniciativas internacionales, reforzando el intercambio de conocimientos a nivel europeo.

- BLOCKWASTE (Educación y Blockchain): Aunque el proyecto destaca por su enfoque en blockchain, su aplicación en el sector de la piedra está liderada por el CTM (Centro de Tecnología de Mármol, Piedra y Materiales). CTM adapta la formación en blockchain para gestores de residuos de piedra, asegurando que las pymes del sector comprendan y puedan aplicar esta tecnología a un nivel práctico.
- ICEBERG (Construcción Circular): Este proyecto emblemático H2020 se centra en la recuperación de materiales de alto valor a partir de residuos de construcción y demolición (CDW). Con un fuerte componente español liderado por Tecnalia e Ihobe, ICEBERG valida tecnologías como la imagen hiperespectral para la clasificación automatizada de fracciones de hormigón y piedra, conectando el final de vida útil de los edificios con nuevos materiales del mercado secundario (ICEBERG Consortium, 2025).



Figura 10: Proyecto europeo de iceberg.

- DigiEcoQuarry y VALREC: Como se detalla en la visión general del sector, estos proyectos son fundamentales para la innovación nacional. ANEFA lidera DigiEcoQuarry, que se centra en la digitalización de la fase de extracción, mientras que Sacyr lidera VALREC, que se centra en rastrear los agregados reciclados hasta el proceso de construcción. Juntos, cubren todo el ciclo, desde el origen hasta el regreso al mercado.
- PERTE Economía Circular: El 'Proyecto Estratégico para la Recuperación y Transformación Económica' (PERTE) actúa como principal motor financiero. Incluye líneas específicas de apoyo para que las empresas implementen sistemas

digitales de trazabilidad y modernicen las instalaciones de tratamiento de residuos, apoyando directamente la adopción de las tecnologías mencionadas (MITECO, 2024).

3.2.3. Implicaciones para RockChain

España ofrece un entorno ideal para implementar proyectos piloto RockChain, con características clave como:

- Acceso a pilotos reales: Iniciativas como DigiEcoQuarry, VALREC e ICEBERG ofrecen estudios de caso específicos que pueden integrarse en actividades de formación.
- Madurez tecnológica: La presencia de tecnologías como la clasificación robótica y los gemelos digitales proporciona contenido avanzado para los planes de entrenamiento.
- Apoyo institucional sólido: La capacidad de acreditación de los laboratorios IGME-CSIC permite vincular las habilidades digitales a estándares de ensayo físico de materiales.

3.3. RUMANIA

Rumanía representa una oportunidad única para un 'salto tecnológico' dentro del contexto europeo. Aunque históricamente ha tenido algunas de las tasas de reciclaje más bajas de la UE —siendo el vertedero la práctica predominante—, el país está experimentando una rápida modernización de su infraestructura de gestión de residuos, impulsada por el Plan Nacional de Recuperación y Resiliencia (PNRR).

Lejos de replicar los modelos tradicionales, el país apuesta directamente por soluciones digitales. Con una inversión significativa en 'eco-islas' y sistemas inteligentes de monitorización, Rumanía está convirtiendo su brecha en la gestión de residuos en un campo de pruebas para el despliegue masivo de IoT (Comisión Europea, 2023; Gobierno de Rumanía, 2022).

3.3.1. Adopción de TI e iniciativas de digitalización

A diferencia de mercados más consolidados, donde los sistemas heredados pueden ralentizar la innovación, Rumanía está construyendo una infraestructura completamente nueva, diseñada desde el principio para ser 'inteligente'.

- Despliegue nacional de IoT (Proyecto Eco-Islands): Bajo el PNRR, se están instalando miles de 'eco-islas digitalizadas' en ciudades como Timișoara, Constanța e Iași. Estos puntos de recogida inteligentes están equipados con módulos GSM, sensores de relleno y sistemas de control de acceso. Se trata de un despliegue nacional de la misma tecnología IoT necesaria para rastrear contenedores de

residuos de piedra, confirmando la viabilidad técnica de esta red (Ministerio de Medio Ambiente, 2024).

- Gemelos digitales en la construcción: Cluj-Napoca, ciudad piloto de la misión NetZeroCities, lidera el uso de gemelos digitales para modelar emisiones urbanas y flujos de materiales. Esta iniciativa combina datos satelitales (Copernicus) con sensores locales para rastrear la huella ambiental del entorno construido. Es un modelo que puede escalarse fácilmente para seguir el ciclo de vida de materiales de construcción y productos de cantera (NetZeroCities, 2024).

3.3.2. Proyectos, programas y políticas relevantes

Diversas iniciativas estratégicas están sentando las bases para avanzar hacia una economía circular digital en el sector rumano de la piedra:

- ROCES 2030 (Estrategia Nacional de Economía Circular): Esta estrategia identifica claramente los sectores de la construcción y la minería como áreas prioritarias. Propone la creación de una plataforma digital nacional para los datos de residuos, sustituyendo a los informes en papel. Para las empresas de piedra, esto anticipa una próxima obligación regulatoria: digitalizar sus inventarios si quieren participar en el mercado de materias primas secundarias (Gobierno rumano, 2023).
- Geocycle Rumanía (Coprocesamiento industrial): Parte del grupo Holcim, Geocycle opera instalaciones avanzadas de pretratamiento que convierten residuos minerales industriales en recursos alternativos para hornos de cemento. Sus plantas en Aleşd y Câmpulung aplican caracterización de laboratorio y estricta trazabilidad. Esta infraestructura industrial existente representa una vía concreta para la recuperación de lodos de piedra, siempre que se cumplan los estándares digitales de calidad requeridos (Geocycle, 2024).



Figura 11: Proyecto Geociclo.

- Clúster Innovador de Biomasa de Energía Verde: Ubicado en la región de Centru, este clúster gestiona proyectos de economía circular como BioRural y SPIRE, conectando los flujos de biomasa y residuos rurales con usuarios industriales. Su modelo de 'cadenas de valor locales' es directamente aplicable en zonas de cantera, donde los residuos de piedra podrían tratarse localmente, evitando transportes costosos e innecesarios (Green Energy Cluster, 2024).

Implicaciones para RockChain

Rumanía ofrece un entorno de alto impacto para la implementación del currículo RockChain, caracterizado por una fuerte demanda de habilidades digitales para acompañar la nueva infraestructura.

- Del papel a la nube: La necesidad de formación más inmediata es apoyar a las pymes en la transición de los registros manuales a los estándares digitales exigidos por la nueva plataforma nacional. RockChain puede ofrecer la orientación práctica necesaria para facilitar este cambio inevitable.
- Aprovechando la nueva infraestructura: Con la expansión de las eco-islas inteligentes, surge una oportunidad única para formar técnicos capaces de operar y mantener activos IoT aplicados a la gestión de residuos. Estas habilidades son aplicables tanto en contextos urbanos como industriales, como la gestión de tanques de lodos de canteras.
- Centros regionales de formación: Clústeres como Green Energy o el ecosistema innovador de Cluj ofrecen redes listas para la difusión del programa de formación, asegurando que las competencias digitales lleguen a los profesionales que operarán el nuevo sistema de gestión de residuos del país.

Interreg  Co-funded by
the European Union
IPA Croatia - Bosnia and
Herzegovina - Montenegro

**Prvi poziv:
odobreno 9 projekata**



Figura 12: Interreg Croacia-Bosnia-Montenegro

3.4. CROACIA

Croacia atraviesa una fase crítica de transformación en la gestión de residuos, acelerada por la urgente necesidad de reconstrucción tras los recientes terremotos. Aunque el volumen total de residuos es moderado en comparación con los grandes países de la UE, los flujos de residuos minerales y de construcción representan la mayor parte del perfil nacional.

El sector está pasando de depender mucho de los vertederos a un enfoque estratégico centrado en la recuperación. El Plan Nacional de Gestión de Residuos 2023–2028 prioriza la modernización de la infraestructura y la implantación de sistemas digitales de seguimiento, con el objetivo de convertir grandes volúmenes de escombros de demolición en recursos útiles en lugar de responsabilidades medioambientales (Boletín Oficial, 2023).

3.4.1. Adopción de TI e iniciativas de digitalización

La digitalización en el sector de la piedra y la construcción de Croacia se está consolidando como una herramienta clave para mejorar la trazabilidad y el control de grandes volúmenes de materiales.

- Registros digitales de escombros: Siguiendo las recomendaciones del Banco Mundial, el país está desarrollando sistemas de grabación digital para residuos de construcción y demolición (CDW). Estos sustituirán los registros en papel por informes digitales obligatorios sobre los sitios de demolición, estableciendo una capa de trazabilidad fácilmente aplicable a los residuos de cantera (Banco Mundial, 2023).
- Estrategia de Especialización Inteligente (S3): La estrategia nacional S3 (2021–2027) incluye como prioridad el 'Entorno Sostenible' y promueve tecnologías como BIM (Modelado de Información de Edificación) y la construcción modular. Este enfoque permite que los materiales —incluida la piedra— sean etiquetados digitalmente desde la fase de diseño, facilitando su recuperación en etapas posteriores.
- Pilotos en logística de residuos: Como parte de proyectos transfronterizos, varios municipios están probando patios de reciclaje equipados con sensores IoT. Estos pilotos permiten monitorizar en tiempo real las entradas y salidas de residuos, proporcionando una primera prueba de concepto para la gestión de materiales digitales en la región.

3.4.2. Proyectos, programas y políticas relevantes

El ecosistema croata se caracteriza por la colaboración internacional activa y el desarrollo de proyectos estratégicos con un fuerte componente tecnológico:

- Plan de Acción para la Economía Circular en CDW: Desarrollado en colaboración con el Banco Mundial, este plan sienta las bases para el futuro del sector. Propone explícitamente la digitalización de los datos de residuos para prevenir vertidos ilegales y promover el mercado de agregados secundarios. Para las empresas del sector de la piedra, esta hoja de ruta deja claro que el cumplimiento digital pronto será un requisito del mercado (Banco Mundial, 2022/2023).
- CircleAware (Proyecto Interreg): Conectando Croacia con Bosnia y Montenegro, este proyecto pone a prueba soluciones innovadoras de separación de residuos. En la localidad de Trilj, se está implementando una solución digital para monitorizar las cantidades de residuos en los depósitos de reciclaje. Aunque se centra en residuos municipales y a pequeña escala, el modelo, que integra separación física con seguimiento digital, es fácilmente replicable para residuos industriales de piedra (Interreg IPA, 2024).
- CrossWaste (Proyecto Interreg): Liderado por EKO-DUNAV d.o.o., este proyecto se centra específicamente en la infraestructura para residuos de construcción, el flujo de residuos más abundante de la región. A diferencia de otros enfoques más teóricos, CrossWaste desarrolla proyectos piloto de hormigón donde los residuos se utilizan como material sostenible en obras viarias locales, demostrando cómo transformar escombros en infraestructuras útiles y combatir el vertido ilegal mediante la recuperación (Interreg IPA, 2024).
- KDeCO net zero (Holcim Croacia): Este es el primer gran proyecto industrial en Croacia cofinanciado por el Fondo de Innovación de la UE. Aunque su objetivo principal es la captura de carbono en la producción de cemento, integra principios de circularidad y gestión digital a gran escala. Establece un nuevo estándar 'Industria 4.0' para el procesamiento de minerales en la región (Comisión Europea/Holcim, 2024).



Figura 13: Proyecto KDeCO.



Implicaciones para RockChain

Croacia ofrece un entorno activo con una alta demanda de soluciones de formación RockChain, en un contexto impulsado por la reconstrucción y digitalización:

- La reconstrucción como oportunidad: La fuerte demanda de materiales derivados de la reconstrucción proporciona una plataforma ideal para formar a profesionales en cómo transformar residuos de piedra en productos certificados para obras públicas.
- Formación en cumplimiento digital: Con el lanzamiento de los registros digitales de residuos de construcción, existe una clara necesidad de formación práctica. RockChain puede cubrir esta carencia ofreciendo contenido sobre el uso eficiente de herramientas digitales de informes.
- Alcance regional ampliado: Gracias a proyectos como CircleAware y CrossWaste, el contenido desarrollado para Croacia puede extenderse fácilmente a países vecinos fuera de la UE, como Bosnia y Montenegro, multiplicando el impacto de RockChain en los Balcanes.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El propósito de este capítulo es evaluar el grado de alineación entre la oferta educativa actual en los cuatro países socios del proyecto (España, Rumanía, Croacia y Alemania) y las nuevas demandas tecnológicas emergentes del sector de la piedra natural.

Se trata de un análisis estratégico de brechas, que compara dos conjuntos diferentes de datos recogidos a lo largo del proyecto:

- Demanda (lo que quiere la industria): Basándose en los hallazgos del Capítulo 3, se define la 'realidad operativa' de las canteras y plantas de procesamiento modernas. Existe una transición clara hacia una gestión basada en datos, que requiere habilidades específicas en sensorización IoT (para lodos y multas), clasificación automática con IA, monitorización volumétrica con drones (UAV) y sistemas de trazabilidad (blockchain o Digital Product Passport - DPP).
- La oferta (lo que ofrece el sistema educativo): Según el mapeo realizado en el WP2, se analizan los programas actuales de educación superior y formación profesional (VET), con especial atención a las áreas de Ingeniería Ambiental, Gestión de Residuos, Tecnología de la Información y Blockchain.

El objetivo principal es evaluar el nivel de preparación operativa. En otras palabras: si una empresa del sector decide digitalizar hoy sus flujos de residuos, ¿existen profesionales en el mercado laboral local con las habilidades híbridas necesarias para apoyar este cambio?

El análisis intenta responder si los perfiles formativos actuales siguen siendo generalistas (por ejemplo, desarrolladores puramente de TIC o geólogos sin habilidades digitales), o si ya existen vías interdisciplinarias que conectan las herramientas digitales con la gestión de materiales industriales.

En los cuatro países analizados, se puede observar un patrón estructural común:

- Expansión tecnológica: La variedad de cursos relacionados con blockchain, análisis de datos e Industria 4.0 está creciendo rápidamente.
- Fortaleza sectorial: Los programas tradicionales en minería, ciencias ambientales y gestión de residuos siguen siendo sólidos y bien establecidos.
- Brecha de integración: Sigue existiendo una desconexión significativa entre ambas áreas. Pocos planes de estudio logran unir estas dos dimensiones, por ejemplo, utilizando los residuos minerales industriales como caso de estudio para enseñar tecnologías digitales.

Las siguientes secciones ofrecen un análisis detallado por país, destacando fortalezas específicas, identificando carencias críticas de habilidades y proponiendo oportunidades concretas de innovación en los planes de estudio de formación.

4.1. ALEMANIA

Alemania se ha consolidado como un referente maduro dentro del panorama europeo, con tasas de recuperación excepcionalmente altas (más del 90% para residuos minerales de construcción) y un marco regulatorio riguroso basado en la Ordenanza de Materiales de Construcción Sustitutivos (EBV). Sin embargo, el sector se enfrenta a una paradoja: aunque la infraestructura física de reciclaje está muy desarrollada, la digitalización de la 'última milla', es decir, la conexión entre los flujos operativos de residuos y los datos en tiempo real, sigue siendo desigual.

Fortalezas en la adopción y oferta de formación en TI

Alemania combina una sólida cultura de datos con capacidad industrial de alta tecnología, proporcionando una base sólida para avanzar hacia una economía circular digital.

- Cultura de datos establecida: A diferencia de otros mercados con información limitada, Alemania ha tenido informes detallados sobre los flujos de materiales minerales desde mediados de los años 90 gracias a la iniciativa Kreislaufwirtschaft Bau. Esta base empírica—estadísticas, balances de masa, mapas de flujo—puede utilizarse directamente en simulaciones y entrenamiento digital aplicado.
- Tradición de formación técnica y formación profesional dual: El sistema dual alemán y sus universidades técnicas ofrecen formación de primera clase en ingeniería de procesos y automatización. El enfoque es profundamente técnico, asegurando que los graduados comprendan tanto los procesos industriales como el funcionamiento de la maquinaria.
- Proyectos operativos de alto nivel: La presencia de iniciativas avanzadas demuestra que la tecnología ya está en funcionamiento, y no solo en fase experimental.
 - o SmartRecycling-Up: Los proyectos de clasificación robótica basados en IA ofrecen casos reales para enseñar la automatización cognitiva aplicada a los residuos.
 - o DigiEcoQuarry: El sitio piloto en Mammendorf representa un entorno totalmente sensorializado, ideal como 'aula digital' para enseñar aplicaciones IoT en procesos extractivos.

Debilidades y lagunas

El principal obstáculo en Alemania no es la falta de tecnología, sino más bien la desconexión entre las estrategias a gran escala y su implementación en la práctica diaria.

- Brecha de implementación: Una encuesta a 130 empresas del sector muestra que, aunque la digitalización se considera una prioridad estratégica, su aplicación práctica tiende a permanecer a nivel administrativo (como la facturación o los portales de clientes), sin llegar a procesos operativos, como la monitorización en tiempo real de lodos o el mantenimiento predictivo.
- Silos curriculares: Persiste una separación rígida entre disciplinas. Los cursos de blockchain suelen estar orientados a los sectores financiero o logístico, mientras que la ingeniería ambiental se centra en las propiedades físico-químicas. Falta módulos interdisciplinarios que apliquen tecnologías como la DLT o la IA a la certificación de residuos minerales, creando una brecha en competencias clave para futuros Pasaportes de Producto Digital.
- Barreras para las pymes: Aunque institutos como Fraunhofer y DFKI están liderando el desarrollo tecnológico, muchas pequeñas canteras y plantas de reciclaje carecen de la experiencia técnica necesaria para traducir estas innovaciones en soluciones rentables y aplicables.

Potencial de integración con los principios de la economía circular

Alemania ofrece el contexto ideal para probar programas de formación con un enfoque de "calidad primero", yendo más allá de la simple desviación de residuos para centrarse en la certificación de productos de alto valor.

- Cumplimiento normativo como habilidad profesional: Con el EBV estableciendo altos estándares de calidad para los materiales secundarios, RockChain puede ofrecer formación especializada sobre cómo utilizar herramientas digitales para demostrar el cumplimiento. Por ejemplo, enseñar a usar blockchain no para criptomonedas, sino para crear un rastro de auditoría inmutable que certifique un lote de agregados reciclados cumple con los requisitos legales.
- Aprovechando casos reales: Los programas de formación pueden construirse directamente en torno a datos y escenarios de proyectos como *SmartRecycling-Up* o *DigiEcoQuarry*. En lugar de basarse únicamente en la teoría, los estudiantes pueden trabajar con datos reales de sensores de un robot clasificador o de una trituradora de cantera para analizar y optimizar la recuperación de materiales.
- Perfiles profesionales híbridos: La Estrategia Nacional de Economía Circular destaca explícitamente la necesidad de "facilitadores digitales". Esto proporciona una base institucional para formar técnicos capaces de manejar tanto los aspectos geotécnicos de los subproductos de la piedra como las arquitecturas de datos necesarias para futuros Pasaportes de Producto Digital.

4.2. ESPAÑA

España funciona como un "laboratorio viviente" para el sector de la piedra. Con un marco regulatorio que penaliza estrictamente los vertederos (Ley 7/2022) e incentiva la circularidad (PERTE Circular Circular), la presión para modernizar es alta. El país acoge algunos de los proyectos piloto más avanzados de Europa, pero el mercado de habilidades aún no ha alcanzado completamente este impulso tecnológico.

4.2.1. Fortalezas en la adopción y oferta de formación en TI

España dispone de las "materias primas" necesarias para una transición digital, tanto en términos de pilotos industriales como de una sólida base educativa.

Pilotos industriales avanzados: El sector no está empezando desde cero. Iniciativas como *DigiEcoQuarry* (coordinada por ANEFA) y *VALREC* (liderada por Sacyr) ya están validando arquitecturas digitales complejas en entornos operativos reales. Las canteras españolas están probando Sistemas Ciberfísicos (CPS) y plataformas de datos en tiempo real para agregados. Además, el despliegue de sistemas IoT a gran escala en la logística urbana (por ejemplo, Sensoneo en Madrid) demuestra la disposición del país para soportar redes de sensores extensas.

Verticales educativas consolidadas: El sistema de educación superior español ofrece vías de formación sólidas—aunque a menudo aisladas—:

- Ingeniería y Medio Ambiente: Programas de grado sólidos en Geología, Minería y Ciencias Ambientales que cubren regulaciones de economía circular y valoración de residuos.
- Industria 4.0: Un catálogo en expansión de programas universitarios y de formación profesional centrados en IoT, Big Data y automatización industrial.
- Blockchain y TI: Una oferta creciente en tecnologías de libro mayor distribuido, a menudo impulsada por centros tecnológicos dinámicos.

4.2.2. Debilidades y brechas

La principal debilidad en España es la fragmentación. Aunque existen habilidades individuales, rara vez se integran de una forma que sea inmediatamente útil para la industria de la piedra tras graduarse.

- La trampa "generalista": Los planes de estudio de gestión de residuos suelen centrarse en residuos municipales o efluentes industriales generales, sin abordar las necesidades específicas de manipulación y reología de los lodos de piedra (por ejemplo, control de humedad, operación de prensa de filtro).
- Formación digital sin contexto: Por el contrario, los cursos de blockchain e IoT suelen estar orientados a fintech, logística o fabricación genérica. Los estudiantes pueden aprender a codificar contratos inteligentes para

criptomonedas, pero no a certificar un lote de agregados reciclados. Hay una falta de habilidades digitales aplicadas en la industria pesada.

- Brecha de habilidades en las pymes: Aunque los grandes centros tecnológicos (por ejemplo, Tecnalia, IETcc-CSIC) cuentan con una experiencia de primer nivel, ese conocimiento no llega lo suficientemente rápido a las pymes. Las canteras pequeñas carecen de personal capaz de traducir conceptos de "cantera digital" en las operaciones diarias, creando un cuello de botella para la adopción tecnológica.

4.2.3. Potencial de integración con los principios de la economía circular

España está en una posición única para salvar estas brechas aprovechando su sólido ecosistema institucional y basado en proyectos.

Aprovechando la Ciencia Acreditada: El Laboratorio de Piedra Natural del IGME-CSIC proporciona marcos estandarizados para ensayos petrográficos y mecánicos. Los planes de estudio de RockChain pueden integrar directamente estos protocolos, enseñando a los estudiantes cómo "digitalizar" un informe de laboratorio en una entrada de blockchain o en un Pasaporte de Producto Digital.

Aprendizaje Basado en Proyectos (PBL): La existencia de sitios piloto activos como *DigiEcoQuarry* e *ICEBERG* ofrece una oportunidad de oro. Los planes de estudio pueden diseñarse en torno a conjuntos de datos reales—como lecturas de sensores de una planta de trituración o imágenes hiperespectrales de un robot clasificador—para que los estudiantes se entrenan en retos industriales reales en lugar de modelos teóricos.

Microcredenciales modulares: Dada la urgencia expuesta en la iniciativa PERTE de Economía Circular, existe un mercado claro para cursos cortos y específicos. Un módulo titulado "Trazabilidad Digital para Subproductos Minerales" tendría un valor inmediato para los profesionales que necesitan cumplir con nuevas normativas e impuestos sobre trazabilidad de residuos.

4.3. RUMANIA

Rumanía representa un escenario de "salto de rana". Históricamente dependiente de los vertederos, el país está ahora evitando pasos intermedios e invirtiendo directamente en infraestructuras digitales avanzadas (eco-islas), impulsadas por su Plan Nacional de Recuperación y Resiliencia (PNRR). El problema no es el hardware, sino la escasez del "software humano" necesario para operarlo.

4.3.1. Fortalezas en la adopción y oferta de formación en TI

El principal motor de Rumanía es la enorme inversión pública en infraestructura de residuos digitales, generando una demanda inmediata de nuevas competencias.

- Boom de inversiones (Liderado por Hardware): El despliegue nacional de eco-islas digitalizadas y sistemas inteligentes de recogida está generando una demanda a gran escala de habilidades técnicas para operar y mantener estos sistemas. La tecnología se está desplegando más rápido de lo que se forma a la fuerza laboral.
- Dirección estratégica: La estrategia ROCES 2030 y el piloto Digital Twin de Cluj-Napoca reflejan un fuerte compromiso político con la circularidad basada en datos. La política nacional aboga explícitamente por una plataforma digital de datos de residuos.
- Oferta industrial: La presencia de actores como Geocycle ofrece un socio industrial de alta tecnología capaz de coprocesar residuos. Sus instalaciones avanzadas de pretratamiento proporcionan un mercado concreto para subproductos de piedra, siempre que se proporcionen datos digitales de calidad.

4.3.2. Debilidades y brechas

El principal desafío en Rumanía es la brecha de implementación, una desconexión entre la infraestructura recién adquirida y las operaciones actuales sobre el terreno.

- Brecha entre papel y en la nube: Muchas pymes siguen dependiendo de libros de registro manuales. La transición a las plataformas basadas en la nube requeridas por la estrategia ROCES implica un enorme esfuerzo de mejora de habilidades que los planes de estudio actuales aún no están abordando.
- Enfoque curricular: Los programas universitarios de gestión de residuos suelen centrarse en los flujos de residuos municipales o en el control general de la contaminación. Rara vez abordan los detalles de los residuos minerales industriales o el potencial del seguimiento digital de materias primas secundarias.
- Escasez de técnicos: Hay una falta de técnicos formados para gestionar la interfaz entre los residuos físicos y los sistemas digitales. Los graduados pueden saber cómo diseñar un vertedero, pero no calibrar un sensor inteligente ni gestionar un registro digital de residuos.

4.3.3. Potencial de integración con los principios de la economía circular

RockChain puede actuar como la capa de "software" que permite el nuevo hardware al ofrecer el contenido de formación necesario para que las inversiones en PNRR sean viables.

- Formación operativa: Desarrollar planes de estudio centrados específicamente en la operación y mantenimiento de los nuevos activos IoT (eco-islas, sensores) que se están desplegando a nivel nacional. Las habilidades necesarias para

gestionar un contenedor municipal inteligente son casi idénticas a las requeridas para contenedores inteligentes de residuos de cantera.

- Cumplimiento de informes digitales: La formación debe apoyar a las pymes en la transición de los registros en papel a los nuevos sistemas nacionales de informes digitales. Este conjunto de habilidades de cumplimiento aporta un valor laboral inmediato.
- Aprendizaje basado en clústeres: Utiliza redes como el Clúster de Biomasa Innovadora de Energía Verde para distribuir formación digital en circularidad a operadores regionales. Este modelo conecta canteras rurales con rutas locales de valorización industrial, creando sistemas de circuito cerrado que reducen las emisiones y costes del transporte.

4.4. CROACIA

Croacia está atravesando una transición única impulsada por la reconstrucción tras el terremoto. Este enorme desafío de ingeniería ha convertido la construcción y los residuos minerales en una prioridad estratégica, acelerando la necesidad de seguimiento y recuperación digital. El sector está pasando de depender de los vertederos a un escenario en el que se necesitan urgentemente los agregados reciclados para los esfuerzos de reconstrucción.

4.4.1. Fortalezas en la adopción y oferta de formación en TI

La principal fortaleza en Croacia es la convergencia de la demanda de mercado y la inversión industrial de alto perfil.

- La reconstrucción como motor: La creciente demanda de materiales de construcción crea un mercado subvencionado y garantizado para los áridos reciclados de alta calidad. Esto está respaldado por el Plan de Acción de Economía Circular del Banco Mundial, que proporciona una hoja de ruta para modernizar el sector.
- Proyectos Industriales Estratégicos: Croacia acoge proyectos de vanguardia de la Industria 4.0. El carbono carbono zero (Carbon Carbon) de KDeCO representa una inversión masiva en la descarbonización del procesamiento mineral, demostrando que la industria local está preparada para soluciones de alta tecnología. Además, el proyecto CrossWaste está pilotando el uso de residuos reciclados de construcción en infraestructuras viales, demostrando aplicaciones prácticas y escalables.
- Alineación de políticas: El Plan Nacional de Gestión de Residuos (2023–2028) y la Estrategia de Especialización Inteligente (S3) promueven explícitamente el uso

de registros digitales y la construcción modular, creando un entorno regulatorio favorable para las competencias digitales.

4.4.2. Debilidades y lagunas

A pesar de los proyectos de alto nivel, existe una brecha significativa de cumplimiento a nivel operativo.

- Brecha de cumplimiento digital: A medida que los registros digitales nacionales de residuos C&D se vuelven obligatorios para prevenir el vertido ilegal, existe una falta crítica de profesionales capacitados para utilizar estos sistemas de forma eficiente. Los pequeños operadores tienen dificultades para pasar del seguimiento en papel a los nuevos estándares digitales de informe.
- Educación aislada: Aunque el sector TIC en Croacia es dinámico, a menudo está desconectado de la industria pesada. Los ingenieros pueden entender las propiedades materiales de la piedra (ingeniería civil), pero a menudo carecen de las *habilidades de datos* necesarias para implementar la trazabilidad o gestionar inventarios digitales.
- Implementación desigual: Aunque existen proyectos emblemáticos, la cantera o empresa de demolición media sigue operando con métodos tradicionales. Las habilidades necesarias para "tender puentes" entre una planta de cemento de alta tecnología y un pequeño patio de reciclaje faltan en los programas actuales de Formación Profesional.

4.4.3. Potencial de integración con los principios de la economía circular

Croacia ofrece un entorno dinámico para la Formación Liderada por la Reconstrucción, donde RockChain puede servir como herramienta de desarrollo de capacidades.

- Formación en cumplimiento y trazabilidad: Los planes de estudio de RockChain deberían centrarse en el uso práctico de los nuevos registros digitales de residuos C&D. Enseñar a los estudiantes a documentar los residuos de piedra para convertirlos en material de reconstrucción certificado crea una empleabilidad inmediata.
- Escalabilidad transfronteriza: A través de proyectos como CircleAware y CrossWaste, los módulos de formación desarrollados en Croacia pueden escalarse fácilmente a países vecinos no pertenecientes a la UE (Bosnia y Herzegovina, Montenegro). Esto posiciona a Croacia como un centro regional de habilidades de circularidad digital en los Balcanes.
- Estudios de caso de alta tecnología: El proyecto KODECO ofrece un estudio de caso de clase mundial para enseñar los principios de la descarbonización industrial y el control digital de procesos. Integrar esto en los planes de estudio



expondría a los estudiantes a la vanguardia absoluta de la tecnología europea de procesamiento mineral.

5. MEJORES PRÁCTICAS

Este capítulo pasa del análisis a la implementación, destacando casos reales en los que las tecnologías digitales están mejorando la gestión de residuos. Estos ejemplos ofrecen lecciones claras para el sector de la piedra ornamental y sirven de información para el currículo de RockChain.

Nos centramos en tres áreas donde las herramientas digitales han demostrado su valor: logística IoT, valoración de residuos de construcción y formación en habilidades digitales. Estas tecnologías demuestran que la "Cantera Digital" ya no es hipotética, sino un modelo funcional listo para replicarse.

5.1. SOLUCIONES DIGITALES PROBADAS

En toda Europa, la digitalización está pasando de ser pilotos a una implementación a gran escala. Identificamos tres soluciones probadas relevantes para el sector de la piedra:

IoT y logística inteligente (Capa de Eficiencia)

Herramientas clave: sensores de nivel de llenado, celdas de carga y optimización de rutas.

- Sensoneo (Madrid): Más de 11.000 sensores redujeron las distancias de recogida en ~ 20%.
- SENS (H2020): El enrutamiento basado en datos redujo las emisiones de CO₂ hasta en un 60%.

Por qué importa: Este enfoque se aplica directamente a los residuos de piedra. Los sensores en tanques o contenedores de lodo ayudan a optimizar las rutas de los camiones y evitar desbordamientos, mejorando la seguridad y reduciendo costes.

Herramientas digitales para CDW (Capa de Valoración)

Herramientas clave: Imagen hiperespectral (HSI), BIM, pasaportes digitales de productos.

- ICEBERG & RECONMATIC: Utilizar IA para ordenar fracciones minerales; BIM para controlar la reutilización.
- CityLoops: Vincula demoliciones y obras a través de plataformas de datos urbanos.

Por qué importa: Los subproductos de la piedra deben tratarse como materiales valiosos de construcción. Herramientas como DPP ofrecen la trazabilidad necesaria para acceder a mercados de alto valor.

EdTech y Blockchain (Capa de Habilidades)

Herramientas clave: Plataformas de e-learning, estudios de caso basados en blockchain.

- BlockWASTE (Erasmus+): Enseña blockchain a través de escenarios reales de residuos.
- EduZWaCE y Build Cero Residuos: Introduce la economía circular en la formación en Formación Veterinaria.

Por qué importa: La tecnología solo es útil en la medida en que las personas la aplican. Estos proyectos muestran cómo se pueden enseñar habilidades digitales utilizando herramientas prácticas y específicas de cada sector.

5.2. LECCIONES PARA EL SECTOR DE PIEDRA

De estos ejemplos se derivan cinco conclusiones clave:

- Empieza con KPIs, no con tecnología: No instales sensores hasta definir qué medir (por ejemplo, €/tonelada procesada, kWh/tonelada).
- Trata los residuos como producto: Herramientas como DPP y datos de laboratorio son esenciales para el cumplimiento legal y del mercado.
- La interoperabilidad es esencial: los sistemas deben compartir datos entre empresas. Las soluciones aisladas fracasan.
- Reglas sobre el código: En blockchain, la gobernanza importa más que la tecnología.
- Salvar la brecha "híbrida": El sector necesita profesionales que comprendan tanto los materiales como los sistemas de datos.

5.3. PAPEL ESTRATÉGICO DE ROCKCHAIN

El cambio digital crea una necesidad real de RockChain. Su valor radica en hacer que las herramientas digitales sean accesibles, comprensibles y prácticas para el sector de la piedra:

Un campo de pruebas sin riesgos

Los pilotos de verdad son caros y arriesgados. RockChain actúa como un simulador seguro: empresas y estudiantes pueden probar IoT, enrutamiento y trazabilidad sin interrumpir operaciones ni invertir capital.



Apontando la brecha IT–Stone

Los equipos digitales y de cantera hablan diferentes idiomas. RockChain integra parámetros reales de materiales en flujos de trabajo digitales, ayudando a los usuarios a navegar tanto en entornos físicos como digitales.

Preparación para la regulación

Se avecinan pasaportes digitales de productos y leyes de trazabilidad de residuos. RockChain ayuda a formar a profesionales para cumplir estos requisitos ahora, haciendo que el cumplimiento forme parte de las operaciones diarias.

RockChain podría ser más que una herramienta de aprendizaje, podría ser un facilitador estratégico, ayudando a la industria de la piedra a adoptar el cambio digital mediante formación práctica y de bajo riesgo, basada en aplicaciones del mundo real.

6. CONCLUSIONES

Una revisión de la gestión de residuos y la adopción de TI en España, Alemania, Rumanía y Croacia muestra un sector en una encrucijada. Los residuos minerales y de construcción dominan en los cuatro países, situando a la industria de la piedra en el centro de la economía circular europea. Sin embargo, aunque existen herramientas digitales (sensores IoT, clasificación por IA, drones), su uso sigue siendo limitado. Los proyectos piloto de alta tecnología se desarrollan junto con sistemas tradicionales basados en papel en la mayoría de las pequeñas y medianas empresas.

El problema no es la tecnología, son las personas. Existe una clara brecha entre las innovaciones disponibles y las habilidades necesarias para aplicarlas en las operaciones diarias. Los gestores de canteras y los operadores de plantas a menudo carecen del conocimiento híbrido para conectar procesos físicos (como la manipulación de lodos o el ensayo de materiales) con plataformas digitales.

Lo que funciona, según las mejores prácticas en toda la UE, es centrarse en los resultados. Los sistemas digitales tienen éxito cuando ayudan a optimizar KPIs como el consumo energético o la calidad de los materiales, no solo cuando añaden gadgets. Para el sector de la piedra, esto significa cambiar la mentalidad: los residuos deben gestionarse como un producto, con controles de calidad y trazabilidad desde el principio.

Aquí es donde la educación falla. Los cursos medioambientales enseñan las reglas, pero no las herramientas. A medida que se endurezcan las normativas (como el EBV de Alemania, la Ley 7/2022 de España o el Pasaporte Digital de Producto de la UE), saber cómo reportar los datos será tan importante como conocer la ley. El panorama actual de la formación no está preparando a los trabajadores para este turno.

También hay una desconexión en el diseño de la formación. Los estudiantes de informática rara vez aprenden sobre materiales industriales, y los de ingeniería rara vez se acerca a sistemas digitales. Países como Rumanía y Croacia están construyendo infraestructuras digitales rápidamente, pero carecen de los técnicos para operarla y mantenerla. Esto crea un riesgo real de que los sistemas de alta gama queden sin usarse.

El sector de la piedra no necesita nueva tecnología, necesita mejores formas de conectar la tecnología con problemas reales. Ahí es donde RockChain puede marcar la diferencia: actuando tanto como traductor como campo de pruebas. Al simular escenarios realistas de cantera con herramientas digitales, ayuda a reducir riesgos, generar confianza y formar a un nuevo tipo de profesional, alguien capaz de convertir los residuos de piedra en material certificado y valioso.

7. REFERENCIAS

- Acatech. (2024). *Facilitadores digitales de la economía circular*. Academia Nacional de Ciencias e Ingeniería. <https://en.acatech.de/publication/digital-enablers-of-the-circular-economy>
- acatech – Academia Nacional de Ciencias e Ingeniería. (2024). *Iniciativa de Economía Circular: Herramientas digitales para la economía circular*. <https://www.circular-economy-initiative.de/>
- Afonso, P., Azzalini, A., Faria, P., Lopes, L., Martins, R., Mourão, P., & Pires, V. (2023). Mortero basado en lodos de la industria de procesamiento de piedra de tamaño carbonato — Un enfoque experimental y de viabilidad. En *Geo-Resiliencia 2023*. Universidade de Évora. <https://dspace.uevora.pt/rdpc/handle/10174/36859>
- Alsayed, A., Bennis, S., & Abdou, A. (2023). Estimación del volumen de reservas en entornos abiertos y confinados: una revisión exhaustiva. *Drones*, 7(8), 537. <https://www.mdpi.com/2504-446X/7/8/537>
- Amaral, L. F., et al. (2020). Morteros ecológicos con añadido de residuos de piedra ornamental — Un enfoque de modelo matemático para la optimización granulométrica. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119283. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119283> papers.ssrn.com
- ANEFA y Consorcio DigiEcoQuarry Consorcio. (2025). *DigiEcoQuarry: Canteras innovadoras de agregados digitales sostenibles del futuro (Proyecto 101003750)*. CORDIS, Comisión Europea. <https://cordis.europa.eu/project/id/101003750>
- Barbir, J., & Dabić, A. (2024). Gestión de residuos de construcción en Croacia. *Química en la industria*, 73(1–2), 57–64. <https://hrcak.srce.hr/file/452586>
- Bassi, F., & Guidolin, M. (2021). Eficiencia de recursos y economía circular en las pymes europeas: Investigación del papel de los empleos y habilidades verdes. *Sostenibilidad*, 13(21), 12136. <https://doi.org/10.3390/su132112136>
- Berg, H., Sebestyén, J., Bendix, P., Le Blevenec, K., & Vrancken, K. (2020). *Gestión digital de residuos*. Informe Eionet – ETC/WMGE 2020/4. Centro Temático Europeo sobre Residuos y Materiales en una Economía Verde. <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-wmge/products/etc-wmge-reports/digital-waste-management>
- Barriga. (2013). *Hamburgo despliega el sistema inteligente de gestión de residuos de Bigbelly*. <https://bigbelly.com/news/hamburg-deploys-bigbellys-smart-waste-management-system> [Soluciones de gestión de residuos de Bigbelly](#)

- Bigbelly / Ayuntamiento de Newham. (2020). *Contenedores inteligentes solares Bigbelly arrasando en Newham, Londres*. <https://aclima.eus/en/noticia/bigbelly-solar-smart-bins-crushing-it-in-newham-london>
- Bigbelly / Dublín Inteligente. (2021). *El proyecto Smart Dublin despliega contenedores Bigbelly en los Docklands*. <https://bigbelly.com/news/smart-dublin-project-deploys-bigbelly-bins-in-the-docklands>
- Consorcio BlockWASTE. (2020–2023). *BlockWASTE – Formación innovadora basada en la tecnología Blockchain aplicada a la gestión de residuos (proyecto Erasmus+ 2020-1-EL01-KA203-079154)*. <https://blockwasteproject.eu> [Grecia sostenible](#)
- BMUV. (2023). *Gestión de residuos en Alemania 2023 – Hechos, datos, cifras*. Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza, Seguridad Nuclear y Protección del Consumidor. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/abfallwirtschaft_2023_en_bf.pdf
- BMUV (Ministerio Federal de Medio Ambiente). (2023). *Ordenanza sobre la introducción de una ordenanza de materiales de construcción sustitutos (Ersatzbaustoffverordnung – EBV)*. <https://www.bmuv.de/en/law/substitute-building-materials-ordinance>
- BMUV. (2024). *La Estrategia Nacional de Economía Circular – Resumen*. Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza, Seguridad Nuclear y Protección del Consumidor. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/nk_ws_zusammenfassung_en_bf.pdf
- BMUV (Ministerio Federal de Medio Ambiente). (2024). *Estrategia Nacional de Economía Circular (NKWS)*. <https://www.bmuv.de/en/topic/water-resources-waste/circular-economy/national-circular-economy-strategy>
- BOE (Boletín Oficial del Estado). (2022). Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular. <https://www.boe.es/eli/es/l/2022/04/08/7>
- Borchard, R., Zeiss, R., & Recker, J. (2022). Digitalización de la gestión de residuos: Perspectivas de empresas alemanas privadas y públicas de gestión de residuos. *Gestión de residuos e investigación*, 40(6), 775–792. <https://doi.org/10.1177/0734242X211029173>
- Bułkowska, K., Gajewska, M., y coautores. (2024). Gestión basada en blockchain de residuos plásticos reciclables. *Energías*, 17(12), 2937. <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/12/2937>

- Consorcio CIRCuIt. (2023). *Construcción circular en ciudades regenerativas (CIRCuIt)*. <https://www.circuit-project.eu>
- CIRPASS. (2024). *CIRPASS – Pasaporte Digital de Producto*. <https://cirpassproject.eu>
- Consorcio CIRPASS. (2024). *El Pasaporte de Producto Digital (DPP) para la Economía Circular: Recomendaciones para políticas, negocios y TI*. Consorcio CIRPASS. https://cirpassproject.eu/wp-content/uploads/2024/05/CIRPASS_The-DPP-for-the-Circular-Economy-Recommendations-for-policy-business-and-IT_v12.pdf
- CIRPASS-2. (2025). *CIRPASS-2 – Pasaporte Digital de Producto para cadenas de valor circulares*. <https://cirpass2.eu>
- Consorcio CityLoops. (2023). *CityLoops – Cerrando el bucle para los flujos de materiales urbanos*. <https://cityloops.eu>
- datos.gob.es. (2024). *Descubriendo el Pasaporte de Producto Digital (DPP) y CIRPASS: Una mirada al futuro de la economía circular*. <https://datos.gob.es/en/blog/discovering-digital-product-passport-dpp-and-cirpass-look-future-circular-economy>
- Consorcio DDC. (2024). *Deconstrucción digital – Renovación y deconstrucción circular en la práctica*. <https://vb.nweurope.eu/projects/project-search/digital-deconstruction>
- DFKI (Centro Alemán de Investigación en Inteligencia Artificial). (2025). *SmartRecycling-Up: Clasificación basada en IA de residuos voluminosos*. <https://www.dfki.de/en/web/research/projects-and-publications/project/smartrecycling-up>
- Dierks, C., Schultmann, F., & Göswein, V. (2024). Evaluación del ciclo de vida consecuente de la gestión de residuos de demolición en Alemania. *Fronteras en sostenibilidad*, 5, 1417637. <https://doi.org/10.3389/frsus.2024.1417637>
- Consorcio EduZWaCE. (2024). *EduZWaCE – Educación para residuos cero y economía circular*. <https://www.eduzwace.eu>
- Comisión Europea. (2023). *Plan de recuperación y resiliencia de Rumanía*. https://commission.europa.eu/business-economy-euro/economic-recovery/recovery-and-resilience-facility/romanas-recovery-and-resilience-plan_en
- Comisión Europea y Gobierno de Rumanía. (2022). *Estrategia de economía circular para Rumanía*. Reforma de la DG – Instrumento de Apoyo Técnico. https://reform-support.ec.europa.eu/system/files/2023-12/CE%20Strategy%20RO_18072022_Final_EN.pdf

Agencia Europea de Medio Ambiente (EEE). (2021). *Residuos y economía circular — Indicadores*. Agencia Europea de Medio Ambiente.
<https://www.eea.europa.eu/themes/waste/indicators>

Agencia Europea de Medio Ambiente (EEE). (2024). *Reciclaje de residuos en Europa*. Agencia Europea de Medio Ambiente.
<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/waste-recycling-in-europe>

Agencia Europea de Medio Ambiente (EEE). (2024). *La economía circular de Europa en hechos y cifras*. Informe de EEE.
<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/europes-circular-economy-in-facts>

Agencia Europea de Medio Ambiente (EEE). (2024). *Perfiles nacionales sobre prevención de residuos 2025 – Croacia: Hoja informativa sobre prevención de residuos 2024*. Agencia Europea de Medio Ambiente.
<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/country-profiles-on-waste-prevention-2025>

Agencia Europea de Medio Ambiente (EEE). (2025). *Generación total de residuos – Croacia (Europa's environment 2025 – Perfil del país)*. Agencia Europea de Medio Ambiente.
<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/europes-environment-country-profiles/total-waste-generation>

Agencia Europea de Medio Ambiente (EEE). (marzo de 2025). *Perfil nacional gestión de residuos – Rumanía: Perfil nacional de gestión de residuos con enfoque en residuos municipales y de envases*. Agencia Europea de Medio Ambiente.
<https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/waste-and-recycling/municipal-and-packaging-waste-management-country-profiles-2025/ro-municipal-waste-factsheet.pdf>

Parlamento Europeo. (21 de marzo de 2024). *Gestión sostenible de residuos: lo que está haciendo la UE*.
<https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20180328STO00751/sustainable-waste-management-what-the-eu-is-doing>

Eurostat. (2024). *Estadísticas de residuos — Estadísticas explicadas (EU-27, datos de 2022)*.
https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics

Centro FRD. (2022). *Oportunidades en digitalización e industria 4.0 en Rumanía 2022*. Servicios de Entrada al Mercado del Centro FRD. <https://www.frdcenter.ro/wp-content/uploads/2022/08/Opportunities-in-digitization-and-industry-4.0-in-Romania.pdf>

- Centro FRD. (2023). *Oportunidades en digitalización e industria 4.0 en Rumanía*. Servicios de Entrada al Mercado del Centro FRD. <https://www.frdcenter.ro/wp-content/uploads/2023/04/Opportunities-in-Digitisation-and-Industry-4.0-in-Romania-FRD-Center-Market-Entry-Services.pdf>
- Gehlot, M. R., & Shrivastava, S. (2023). Utilización de residuos de piedra en el desarrollo de mortero sostenible: una revisión de última generación. *Materiales hoy: Actas*, 80, 1688–1696. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.325>
- Gobierno de Rumanía. (2017). *Plan Nacional de Gestión de Residuos (PNGD)*. Ministerio de Medio Ambiente. https://www.mmediu.ro/app/webroot/uploads/files/PNGD_vers5.pdf
- Gobierno de Rumanía. (2018). *Plan Nacional de Gestión de Residuos*. Gobierno de Rumanía. <https://anpm.ro/documents/16755/42624324/Planul+National+de+Gestionare+a+Deseurilor.pdf>
- Gobierno de Rumanía. (2022). *Estrategia Nacional sobre la Economía Circular (Informe AS-IS y ROCES 2030)*. Departamento de Desarrollo Sostenible. <https://dezvoltaredurabila.gov.ro/circular-economy>
- Himmy, O., Nguyen, T. T., Vazhacharickal, P. J., & Buerkert, A. (2025). Monitorización de canteras de granito mediante aprendizaje profundo y fotogrametría de UAV en Bengaluru, India. *PLOS ONE*, 20(11), e0334493. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0334493>
- Consorcio HISER. (2019). *Soluciones Innovadoras Holísticas para un Reciclaje y Recuperación Eficientes de Materias Primas Valiosas a partir de Residuos Complejos de Construcción y Demolición (HISER)*. <https://cordis.europa.eu/project/id/642085>
- Consorcio ICEBERG. (2024). *ICEBERG – Soluciones innovadoras basadas en economía circular que demuestran la recuperación eficiente de recursos materiales valiosos de materiales al final de su vida útil*. <https://iceberg-project.eu>
- Consorcio ICEBERG. (2025). *ICEBERG: Economía circular innovadora basada en recuperación y clasificación avanzadas*. CORDIS Comisión Europea. <https://cordis.europa.eu/project/id/869336>
- IGME-CSIC. (2017). *Los laboratorios del IGME*. Instituto Geológico y Minero de España – CSIC. https://web.igme.es/servicios/labora_3C/CartaSer/Los%20Laboratorios%20del%20IGME.pdf
- Interreg EUROPA CENTRAL. (2025). *Análisis de las estrategias regionales S3 para la economía circular y el desarrollo sostenible de productos (Sección 2.3: Croacia)*.

Interreg EUROPA CENTRAL. <https://www.interreg-central.eu/wp-content/uploads/2025/03/Analysis-of-S3-regional-strategies.pdf>

Interreg VI-A IPA Croacia–Bosnia y Herzegovina–Montenegro. (2025). *CircleAware: Impulsando la Concienciación y Acelerando la Transición a la Economía Circular (Proyecto HR-BA-ME00025)*. keep.eu. <https://keep.eu/projects/29425>

Iyiola, C. O., Shakantu, W., & Daniel, E. I. (2024). Tecnologías digitales para promover la gestión de residuos de construcción y demolición: una revisión sistemática. *Edificios*, 14(10), 3234. <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/10/3234>

Kabugo, J. C., Jämsä-Jounela, S.-L., Schiemann, R., & Binder, C. (2020). Plataforma de análisis de datos de procesos basada en la industria 4.0: un estudio de caso de planta de conversión de residuos a energía. *Revista Internacional de Sistemas de Energía y Energía Eléctrica*. <https://aaltodoc.aalto.fi/items/0b69cd0c-4a29-44fd-b67c-c6237df3580e>

Kannan, D., et al. (2024). Gestión inteligente de residuos 4.0: La transición de una revisión sistemática a un marco integrado. *Gestión de residuos*, 174, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.08.041>

Khan, S., Ali, B., Alharbi, A. A. K., Alotaibi, S., y Alkathami, M. (2024). Recogida eficiente de residuos asistida por IoT para ciudades urbanas inteligentes. *Sensors*, 24(10), 3167. <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/10/3167>

Kokamägi, K., Türk, K., & Liba, N. (2020). Fotogrametría de UAV para cálculos de volumen: Comparación con RTK GNSS y TLS. *Agronomy Research*, 18(3), 2087–2102. https://dspace.emu.ee/bitstream/10492/6206/4/AR2020_Vol18No3_Kokamagi.pdf

Kovanič, L., Greif, V., & Kučera, M. (2023). Revisión de aplicaciones fotogramétricas y LiDAR de UAVs en topografía. *Ciencias Aplicadas*, 13(11), 6732. <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/11/6732>

Construcción de economía circular. (2024). *Residuos minerales de construcción – Seguimiento 2022: Informe sobre la generación y el destino de los residuos minerales de construcción en 2022*. Construcción de economía circular. <https://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/baustoffindustrie.de>

Lenz, R., et al. (2021). Formación innovadora basada en la tecnología Blockchain aplicada a la gestión de residuos – BLOCKWASTE. SSRN. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3912646

LIPOR. (2025). *AI4Waste – Inteligencia artificial aplicada a la prevención y gestión de residuos orgánicos*. <https://www.lipor.pt/pt/inovar/projetos-financiados/erasmus-ai4waste>

- Maciel, R. R., et al. (2025). El impacto de la optimización del enrutamiento habilitada por IoT en la distancia de recogida de residuos: una revisión sistemática y metaanálisis. *Máquinas*, 13(4), 161. <https://www.mdpi.com/2305-6290/13/4/161>
- Manshoven, S., & Gillabel, J. (2021). Aprender a través del juego: Un juego serio como herramienta para apoyar la educación en economía circular y la innovación en modelos de negocio. *Sostenibilidad*, 13(23), 13277. <https://doi.org/10.3390/su132313277>
- Ministerio de Economía y Desarrollo Sostenible. (2023). *Plan de Gestión de Residuos de la República de Croacia para el periodo 2023–2028 (Boletín Oficial 84/23)*. Gobierno de la República de Croacia. <https://perma.cc/5W2Z-5KRF>
- MITECO (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico). (2020). *España Circular 2030. Estrategia Española de Economía Circular*. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/estrategia.html>
- MITECO. (2024). *Proyecto Estratégico para la Recuperación y Transformación Económica (PERTE) de Economía Circular*. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/perte-en-ec.html>
- Moreira, P. I., et al. (2022). Residuos de procesamiento de piedras ornamentales incorporados en la producción de morteros. *Sostenibilidad*, 14(10), 5904. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/10/5904>
- Năstase, C., Tănase, G. L., & Ionescu, A. M. (2019). Gestión de residuos municipales en Rumanía en el contexto de la UE. *Desarrollo Tecnológico y Económico de la Economía*, 25(5), 1113–1131. <https://journals.vilniustech.lt/index.php/TEDE/article/download/10295/8890>
- NetZeroCities. (2024). *Cluj-Napoca: Perfil de ciudad piloto – Gemelos digitales para la neutralidad climática*. <https://netzerocities.eu/pilot-cities/>
- Onur, N. (2024). Digitalización y aplicaciones digitales en el reciclaje de residuos. *Sostenibilidad*, 16(17), 7379. <https://doi.org/10.3390/su16177379>
- RECONMATIC Consortium. (2023). *RECONMATIC – Soluciones automatizadas para la gestión sostenible y circular de residuos en construcción y demolición*. <https://www.reconmatic.eu>
- Roba, J., Kuppens, T. E., Janssens, L., Smeets, A., Manshoven, S., & Struyven, K. (2021). Juegos serios en la educación secundaria para introducir la economía circular: Experiencias con el juego ecoCEO. *Fronteras en sostenibilidad*, 2, 690232. <https://doi.org/10.3389/frsus.2021.690232>

- Sensoneo. (2023). *La mayor instalación de residuos inteligentes de Europa lanzada en Madrid*. <https://sensoneo.com/europes-largest-smart-waste-installation-in-madrid>
- Sensoneo. (2024). *Despliegue a gran escala de residuos inteligentes en Madrid: estudio de caso*. <https://sensoneo.com/references/madrid-spain/>
- Consorcio de SMS. (2022). *S.M.S. – Gestión inteligente de residuos para escuelas en clúster más inteligentes (proyecto Erasmus+ 2020-1-RO01-KA229-079971)*. <https://sms-erasmus.cnlr.ro>
- Sosunova, I., & Porras, J. (2022). Sistemas inteligentes de gestión de residuos habilitados por IoT para ciudades inteligentes: una revisión sistemática. *IEEE Access*, 10, 73326–73363. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9815251>
- Street. (2025). *Fuengirola avanza hacia una ciudad más inteligente y sostenible*. <https://www.futurestreet.com/fuengirola-moves-toward-a-smarter-more-sustainable-city>
- Voukkali, I., Papamichael, I, Loizia, P., Zorpas, G., & Zorpas, A. A. (2023). Métricas de residuos en el marco de la economía circular. *Ciencia del Medio Ambiente Total*, 866, 161154. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37602734>
- Banco Mundial. (2022). *Enfoques de economía circular en la gestión de residuos sólidos – Croacia (P176636)*. Grupo Banco Mundial. <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099700410112212044/p1766360f782e309083e900cf5f56b1a2a6>
- Banco Mundial. (2022). *Gestión circular de residuos de construcción en Croacia: desde materia prima hasta residuos y viceversa*. Grupo Banco Mundial. <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2022/07/06/circular-construction-waste-management-in-croatia-from-raw-material-to-waste-and-back>
- Banco Mundial. (2023). *Croacia: Desarrollo de un Plan de Acción de Economía Circular sobre Residuos de Construcción y Demolición – Plan de Acción CE y su hoja de ruta / análisis de medidas prioritarias*. Banco Mundial. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099200312132233388/pdf/P173141085f27a0490af1302f2b0f6d1701.pdf>
- Zhao, W., et al. (2025). Aplicación de tecnologías digitales en la gestión de residuos de construcción: un enfoque de cartografía científica. *Journal of Environmental Management* (en prensa). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479724035461>

Fuentes de las cifras

Figure 1. Grunver. *Pasaporte digital de producto (DPP)*. <https://grunver.com/pasaporte-digital-de-producto-dpp-grunver/>

Figura 2. Eurostat. *Estadísticas de desperdicio*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics

Figura 3. KPMG Orígenes. *KPMG Origins – plataforma de datos de confianza*. <https://kpmgorigins.com/>

Figura 4. Supera las TIC. *Gestión inteligente de residuos*. <https://exceedict.com/smart-waste-management/>

Figura 5. Universidad de Aalborg. *¿Green Deal o No Deal? La encrucijada climática de la UE*. <https://www.ssh.aau.dk/green-deal-or-no-deal-the-eu-s-climate-crossroads-e145771>

Figura 6. Ciudadanos europeos del futuro. *¿Qué es la transición de gemelos?* <https://www.europeanfuturecitizens.eu/what-is-the-twin-transition/>

Figura 7. Proyecto BlockWASTE. *Resumen del proyecto*. <https://blockwasteproject.eu/es/>

Figura 8. Proyecto DigiEcoQuarry. *Resumen del proyecto*. <https://digiecoquarry.eu/>

Figura 9. Sensoneo. *Soluciones inteligentes de gestión de residuos*. <http://sensoneo.com/>

Figura 10. Proyecto ICEBERG. *Estudios de caso*. <https://iceberg-project.eu/case-studies/>

Figura 11. Holcim Rumanía. *Servicios de construcción y soluciones circulares*. <https://www.holcim.ro/ro/servicii>

Figura 12. Unión Europea. *Interreg VI-A IPA – primeros proyectos aprobados (Croacia–Bosnia y Herzegovina–Montenegro)*. <https://www.eu.me/en/the-first-9-projects-within-the-interreg-vi-a-ipa-program-croatia-bosnia-and-herzegovina-montenegro-have-been-approved/>

Figura 13. Holcim Croacia. *Proyecto de emisiones netas cero de KODECO*. <https://www.holcim.hr/KODECO-net-zero>